

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y CONTROL DE UN BANCO DE  
ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE ACTUADORES  
BLANDOS**

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Autor: Adrián Blanco Barragán

Tutor: José Medina Hernández

Leganés, septiembre de 2015



# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	IV
ÍNDICE DE TABLAS .....	VI
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	VII
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
<b>1. PLANTEAMIENTO.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. MOTIVACIÓN .....	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.4. PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO .....	3
1.5. PRESUPUESTO.....	4
1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	4
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>6</b>
2.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA BLANDA.....	6
2.2. INVESTIGACIÓN Y PRIMEROS PASOS DE LA ROBÓTICA BLANDA .....	8
2.3. TECNOLOGÍA DE LOS ROBOTS BLANDOS .....	10
2.3.1. Actuadores.....	11
2.3.1.1. Actuadores eléctricos blandos.....	11
2.3.1.2. Actuadores neumáticos blandos (SPAs).....	12
2.3.2. Sensores.....	15
2.4. DESAFÍOS SOBRE LA ROBÓTICA BLANDA .....	17
<b>3. BANCO DE CONTROL.....</b>	<b>18</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	18
3.2. REQUISITOS.....	18
3.3. DISEÑO.....	19
3.4. MONTAJE .....	21
3.4.1. Base .....	21
3.4.2. Manómetro.....	21
3.4.3. Electroválvulas .....	22
3.4.3.1. Electroválvulas para el control de presión positiva.....	22
3.4.3.2. Electroválvulas para el control de vacío.....	22
3.4.4. Circuito de potencia para las válvulas .....	23
3.4.5. Eyectores.....	24
3.4.6. Sensores de presión.....	24
3.4.7. Sensor de vacío .....	25
3.4.8. Racores y tubos neumáticos .....	26
3.4.9. Switches y potenciómetros.....	26
3.4.10. Controlador myRIO .....	26
3.4.11. Otros dispositivos .....	27
3.4.11.1. Fuente de alimentación 24V.....	27
3.4.11.2. Toma de aire a presión .....	27
3.5. INSTALACIÓN ELÉCTRICA .....	28



3.5.1. Esquema eléctrico de las válvulas y su circuito de activación .....	28
3.5.2. Esquema eléctrico de los potenciómetros y switches .....	30
3.6. INSTALACIÓN NEUMÁTICA .....	30
<b>4. ADQUISICIÓN Y CONTROL.....</b>	<b>32</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	32
4.2. SISTEMA MYRIO Y LABVIEW .....	32
4.3. ADQUISICIÓN DE DATOS .....	33
4.3.1. Presión .....	34
4.3.1.1. Presión positiva .....	34
4.3.1.2. Vacío .....	35
4.3.2. Deformación .....	36
4.4. MODELO DE ACTUADOR A SOMETER A ENSAYO.....	37
4.5. PROGRAMA DE CONTROL .....	38
4.6. CONTROL DE PRESIÓN POSITIVA.....	39
4.6.1. Sistema PID-PWM con una electroválvula .....	41
4.6.2. Sistema PID-PWM con dos electroválvulas .....	46
4.6.3. Sistema PID-PWM con una electroválvula + filtro .....	48
4.7. CONTROL DE PRESIÓN NEGATIVA .....	50
4.8. RESULTADOS.....	51
<b>5. CASOS DE ESTUDIOS .....</b>	<b>53</b>
5.1. INTRODUCCIÓN .....	53
5.2. ACTUADOR PNEUNETS.....	53
5.3. PINZA DE TRES DEDOS.....	56
5.4. ACTUADOR JAMMING.....	57
<b>6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>59</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>65</b>
I. PRESUPUESTO DETALLADO .....	65
II. PLANO DEL BANCO DE ENSAYOS.....	66
III. INTERFAZ DEL PROGRAMA .....	67
III.a. Pantalla de inicio.....	67
III.b. Pantalla Monitor .....	68
III.c. Pantalla de control de presión .....	69
III.d. Pantalla de control de vacío .....	70
IV. BLOQUES DE PROGRAMACIÓN .....	71
IV.a. Código de la pantalla Monitor.....	71
IV.b. Código de la pantalla de control.....	72
IV.c. Código del Controlador PID .....	73
IV.d. Código de la calibración del sensor de presión .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Robots tradicionales .....	1
Figura 2.1. Curiosity .....	6
Figura 2.2. Robot blando desarrollado en la Universidad de Harvard .....	7
Figura 2.3. Robots blandos inspirados biológicamente .....	9
Figura 2.4. Teodor, robot militar .....	10
Figura 2.5. Principio de funcionamiento de un polímero electroactivo .....	11
Figura 2.6. Estructura del actuador Pneunets .....	13
Figura 2.7. Cavidades interiores del actuador Pneunets .....	13
Figura 2.8. Estructura del actuador blando reforzado con fibra .....	14
Figura 2.9. Diferentes tipos de disposición de la fibra a lo largo del actuador .....	14
Figura 2.10. Músculo artificial en relajación y contracción .....	15
Figura 2.11. Estructura del sensor EGaln .....	16
Figura 2.12. Sensor TakkTile con y sin goma .....	16
Figura 3.1. Banco de ensayos .....	20
Figura 3.2. Perfiles de aluminio en la base del banco de ensayos .....	21
Figura 3.3. Manómetro .....	21
Figura 3.4. Electroválvulas SY114 .....	22
Figura 3.5. Electroválvulas SY5120 .....	23
Figura 3.6. Optoacoplador y MOSFET .....	23
Figura 3.7. Sección longitudinal del eyector y su funcionamiento .....	24
Figura 3.8. Eyectores sobre el banco de ensayos .....	24
Figura 3.9. Sensores de presión conectados al circuito neumático .....	25
Figura 3.10. Sensor de vacío sobre el banco de ensayos .....	25
Figura 3.11. Switches y potenciómetros del banco de control .....	26
Figura 3.12. Microcontrolador myRIO .....	27
Figura 3.13. Fuente de alimentación de 24 V .....	27
Figura 3.14. Toma de aire a presión .....	28
Figura 3.15. Circuito eléctrico de protección del microcontrolador y activación de las electroválvulas .....	29
Figura 3.16. Circuito eléctrico de los switches y potenciómetros .....	30
Figura 3.17. Instalación neumática general .....	31
Figura 4.1. Microcontrolador myRIO .....	32
Figura 4.2. LabVIEW .....	33
Figura 4.3. Flujo de información en el sistema de control .....	34
Figura 4.4. Toma y representación de datos para la calibración del sensor de vacío .....	35
Figura 4.5. Actuador Pneunets bajo diferentes presiones .....	36
Figura 4.6. Coordenadas en el actuador para medir la deformación .....	36
Figura 4.7. Diagrama de flujo del programa .....	39
Figura 4.8. Flujo de señales en un controlador PID .....	40
Figura 4.9. Señal equivalente a PWM .....	41
Figura 4.10. Circuito neumático para control de un actuador con una válvula .....	42
Figura 4.11. Oscilaciones constantes para una ganancia crítica $K_{cr}$ con un periodo crítico $P_{cr}$ .....	43
Figura 4.12. Respuesta del PID sintonizado con parámetros calculados por el método Ziegler-Nichols .....	44
Figura 4.13. Oscilaciones constantes sin llegar al SP con $K_p = 20$ .....	45
Figura 4.14. Introducción de parámetro integral. Oscilaciones constantes en torno a SP .....	45
Figura 4.15. Circuito neumático para el control de presión con dos electroválvulas .....	46

Figura 4.16. Respuesta del actuador para un control con dos válvulas con $K_p = 20$ y $T_i$ muy bajo .....	47
Figura 4.17. Respuesta del actuador para un control con dos válvulas con $K_p = 20$ y aumentando $T_i$ .....	47
Figura 4.18. Circuito neumático para el control de presión con una electroválvula y filtro neumático .....	48
Figura 4.19. Tubo neumático con algodón en su interior conectado a una jeringuilla .....	49
Figura 4.20. Analogía eléctrica al filtro paso bajo neumático.....	49
Figura 4.21. Respuesta del actuador con un control con una electroválvula y filtro neumático .....	50
Figura 4.22. Circuito neumático para el control de vacío.....	50
Figura 4.23. Respuesta del actuador ante la activación del vacío.....	51
Figura 5.1. Geometría y estructura del actuador Pneunets visto desde su sección longitudinal .....	53
Figura 5.2. Actuador Pneunets en reposo y a 26 psi.....	54
Figura 5.3. Gráfica de deformación del actuador Pneunets en función de su presión .....	55
Figura 5.4. Fuerza que desarrolla el extremo del actuador en función de la presión en su interior .....	55
Figura 5.5. Actuador sujetando diferentes objetos .....	56
Figura 5.6. Estructura del actuador Jamming .....	57
Figura 5.7. Actuador Jamming sujetando diferentes objetos.....	58
Figura III.A. Pantalla de Inicio.....	67
Figura III.B. Pantalla Monitor.....	68
Figura III.C. Pantalla de Control de presión.....	69
Figura III.D. Pantalla de Control de vacío .....	70
Figura IV.A. Código de la pantalla Monitor .....	71
Figura IV.B. Código de control para el canal 1 de aire a presión.....	72
Figura IV.C. Código del controlador PID.....	73
Figura IV.D. Calibración del sensor de presión, convirtiendo tensión a presión .....	73



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tiempo de ocupación de las tareas realizadas.....	4
Tabla 2.1. Características de los diferentes tipos de robots dependiendo de su dureza.....	8
Tabla 4.1. Repercusión de los parámetros del PID sobre la señal .....	40
Tabla 4.2. Señales de los dispositivos que recibe el myRIO y su función .....	42
Tabla 4.3. Cálculo de los parámetros del PID en función de Kcr y Pcr.....	44
Tabla 4.4. Resultado de los parámetros del PID con el método Ziegler-Nichols.....	44
Tabla 4.5. Tabla de estados de las electroválvulas .....	46



## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Calibración del sensor de presión.....	35
Ecuación 2. Calibración del sensor de vacío.....	35
Ecuación 3. Conservación del trabajo .....	37
Ecuación 4. Trabajo de entrada.....	37
Ecuación 5. Trabajo de salida.....	37
Ecuación 6. Conservación del trabajo de entrada y salida .....	37
Ecuación 7. Conservación del trabajo de entrada y salida en el actuador blando.....	37
Ecuación 8. Respuesta del PID en función del tiempo .....	40
Ecuación 9. Respuesta del PID en función del tiempo con $T_i$ y $T_d$ .....	40



## RESUMEN

En el presente documento se detalla el diseño, fabricación y puesta en marcha de un banco de ensayos con el objetivo de desarrollar un entorno de control para actuadores y dispositivos robóticos blandos. Los robots blandos son un tipo de robots fabricados con materiales altamente deformables que permiten desarrollar aplicaciones y dar soluciones que la robótica tradicional no es capaz de proporcionar. La importancia de este proyecto es que permite disponer de un sistema flexible y reconfigurable para el estudio de robots blandos.

El banco de ensayos consiste en una base sobre la que van situados varios módulos con diversos componentes y dispositivos, conformando así una instalación electroneumática, donde el circuito electrónico se encarga de controlar al circuito neumático. En cuanto al control de la instalación, el software está desarrollado en LabVIEW, plataforma de desarrollo de National Instruments ideal para sistemas de medida y control. Esta aplicación es procesada por un dispositivo embebido de bajo coste (NI myRIO), que cuenta con un procesador programable que ejecuta un sistema operativo en tiempo real, así como un FPGA personalizado.

Tras el montaje del banco de pruebas y la implantación de un programa de control general, se han estudiado varias alternativas de control para actuadores blandos. Esto se ha llevado a cabo mediante el desarrollo de distintos programas de control y diversas configuraciones de la instalación neumática, también recogidos en esta memoria.



## ABSTRACT

This document shows the design, manufacturing and start up of a testing bench in order to develop a control environment for soft robotic devices and actuators. Soft robots are a kind of robots made of highly deformable materials that allow developing applications and providing solutions that traditional robotics is not able to provide. The point of this project is that it provides a flexible and reconfigurable system to study and evaluate soft robots.

The testing bench consists of different modules holding several components and devices all over a base. The result is an electropneumatic installation, where the electronic circuit controls the pneumatic one. Regarding the control of the installation, the software is developed in LabVIEW, which is a very suitable programming platform for measurement and control systems. The application is processed by a low cost embedded device, which is the NI myRIO. This device holds a customized FPGA and a programmable processor that executes an OS in real time.

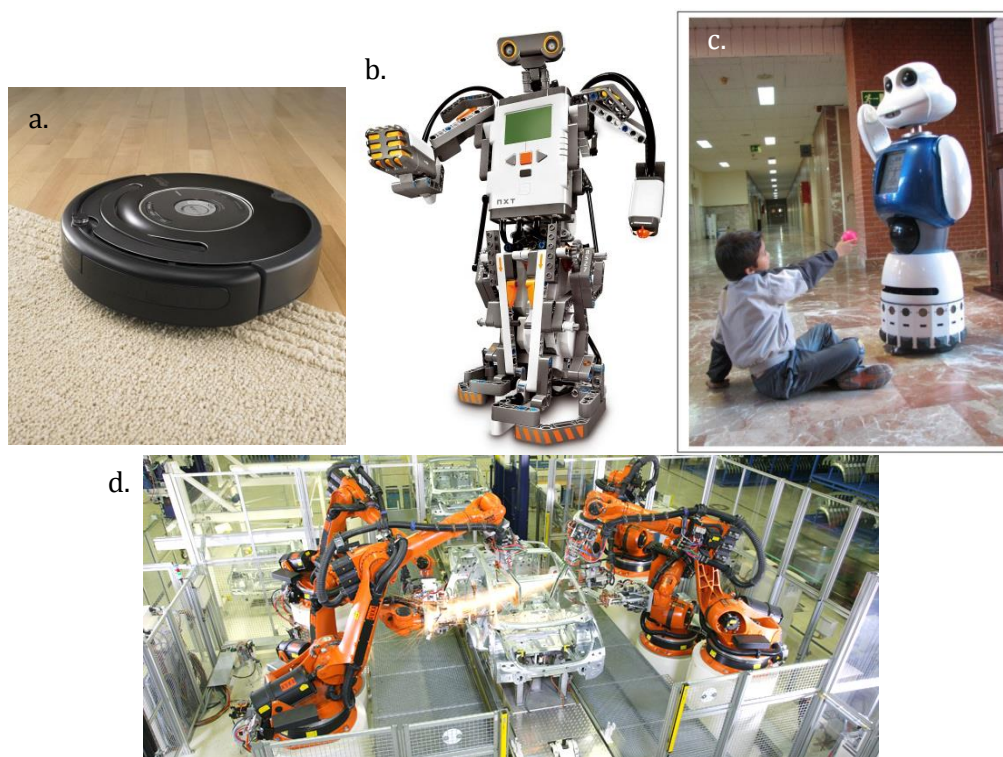
After the assembling of the control bench and the development of a general control program, some control strategies for soft robotic actuators have been tested. This has been carried out developing different control strategies and designing different pneumatic installations, which are also shown and discussed in this paper.



# 1. PLANTEAMIENTO

## 1.1. INTRODUCCIÓN

Con el tiempo la robótica comienza a estar cada vez más presente en diferentes actividades tanto de la vida cotidiana como en aspectos más específicos y entornos profesionales, clasificándose de diferentes maneras según su morfología, el procedimiento de control empleado, o concretamente la aplicación que se vaya a desarrollar [1]. De esta manera se puede encontrar desde robots de cocina o robots-aspiradoras hasta robots usados en cirugía o brazos robóticos utilizados en cadenas industriales de montaje (ver figura 1.1.).



**Figura 1.1.** Robots tradicionales. (a) Roomba [2] . (b) Lego Mindstorms [3]. (c) Maggie [4]. (d) Brazos robóticos Kuka [5].

Dentro de estas categorías, una de las ramas más recientes de la robótica y que cada vez está despertando más interés en la comunidad científica es la denominada robótica blanda o suave. Este tipo de robótica se caracteriza principalmente por el empleo de materiales blandos, flexibles y deformables como cuerpo principal del robot en cuestión, lo que le confiere unas características físicas y un principio de funcionamiento distinto a la robótica tradicional.

Esto se traduce en nuevas formas de diseño y actuación donde principios de funcionamiento menos convencionales son los que imperan sobre estos dispositivos robóticos. De esta forma se consiguen formas de operación, propiedades y especificaciones muy distintas a

otras aplicaciones robóticas de cortes más tradicionales, logrando así ventaja en situaciones donde esta robótica más tradicional no consigue alcanzar las especificaciones requeridas [6].

El proyecto consiste en el diseño, fabricación y puesta en marcha de un banco de pruebas con el objetivo de someter a ensayos a sensores y actuadores blandos bajo el desarrollo de un software de control. El diseño del banco de pruebas está pensado para que tenga una configuración modular. Esto implica que sobre la base principal van montados los diferentes dispositivos hardware, cada uno sobre su módulo individual. De esta manera los módulos son intercambiables por otros distintos y tanto la ubicación como la distribución de los componentes es totalmente reconfigurable.

Una vez conocidos los parámetros con los que trabajará el banco de pruebas, tales como tensiones de alimentación o rangos de presiones, y la topología de los circuitos neumático y electrónico, se dispone a situar y a conectar los componentes sobre la base.

## 1.2. MOTIVACIÓN

La robótica blanda constituye una alternativa muy interesante a la hora de diseñar determinadas soluciones. Por naturaleza, la sociedad intenta cada vez más automatizar procesos o simplificar tareas que se realizan de forma cotidiana con el objetivo de facilitar el día a día, y es por ello que la robótica cobra cada vez más importancia y es más utilizada en más aspectos y situaciones de nuestra sociedad. Más concretamente, la robótica blanda es capaz de cubrir ciertas necesidades donde otras alternativas no son tan eficaces.

La razón del desarrollo de este proyecto consiste en comprender y evaluar el funcionamiento tanto de estos robots como de sus posibles aplicaciones y principios de funcionamiento. De esta forma se podrá tener una imagen más clara sobre esta rama de la robótica, discutir ciertos aspectos y resultados, y sacar varias conclusiones.

Aunando esa inquietud del ser humano hacia la comodidad y mejora de la calidad de vida, junto con unos conocimientos más amplios y claros sobre este campo de la robótica, se pueden conseguir resultados que mejoren la seguridad, polivalencia y eficiencia que otras soluciones en el mundo de la robótica actualmente ofrecen.

## 1.3. OBJETIVOS

El objetivo en de este proyecto consiste de una forma sencilla y simple en la fabricación y puesta en marcha de una plataforma de ensayos para el sometimiento a pruebas a robots blandos.

Durante el desarrollo de este proyecto se pudieron diferenciar varias etapas secuenciales que se fueron cumpliendo con el propósito de alcanzar el resultado final. Estas fases del proyecto las podríamos dividir en:

- Estudio de los requerimientos y especificaciones de las aplicaciones robóticas que serán sometidas a estudio, para la posterior adquisición de materiales y dispositivos necesarios para la fabricación del banco de pruebas.
- Cálculo de dimensiones del banco de ensayos, así como el montaje de todas sus piezas y dispositivos que formen parte de él. Posteriores mediciones y comprobaciones para verificar el correcto funcionamiento de todos los elementos del banco de pruebas.
- Diseño del software de control que ejecutará el microprocesador de la plataforma de pruebas. En esta fase se han realizado diversos diseños y pruebas con la finalidad de encontrar la estrategia de control más eficaz y preciso posible.
- Visualización y adquisición de datos para la evaluación de los resultados obtenidos y una posterior discusión de las conclusiones.

#### 1.4. PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO

Tras la definición de los objetivos, se muestran las tareas realizadas para su consecución y lo que ha durado cada una a lo largo del proyecto (ver tabla 1.1.):

Tarea 1: Investigación y estado del arte sobre la robótica blanda. Comprensión de sus principios de funcionamiento.

Tarea 2: Definición de objetivos y tareas a realizar.

Tarea 3: Definición de los requerimientos, especificaciones y diseño del banco de ensayos.

Tarea 4: Compra y adquisición de materiales para la fabricación del banco de ensayos.

Tarea 5: Fabricación y montaje del banco de ensayos.

Tarea 6: Pruebas de funcionamiento y calibraciones del banco.

Tarea 7: Desarrollo de un software para el control de presión y de vacío de actuadores blandos.

Tarea 8: Desarrollo de un programa que permita al usuario controlar el banco de ensayos, permitiéndole someter a ensayo varios actuadores blandos simultáneamente y comprobar el estado de los dispositivos del banco en todo momento.

Tarea 9. Pruebas y ensayos con actuadores blandos. Toma de datos, obtención de resultados y conclusiones.

## Tarea 10: Realización de la memoria

**Tabla 1.1.** Tiempo de ocupación de las tareas realizadas.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Tarea 1	■	■							
Tarea 2		■							
Tarea 3		■	■						
Tarea 4		■	■						
Tarea 5		■	■	■	■	■	■	■	■
Tarea 6				■	■	■	■	■	■
Tarea 7				■	■	■	■	■	■
Tarea 8							■	■	■
Tarea 9									■
Tarea 10									■

## 1.5. PRESUPUESTO

El presupuesto del proyecto está centrado en la fabricación del banco de ensayos. Este presupuesto se ha visto reducido considerablemente gracias al gran volumen de materiales y dispositivos reutilizados, que previamente han sido usados en otros proyectos o aplicaciones de la universidad.

El valor total del presupuesto asciende a 1.248,54 €, y gracias a la reutilización de materiales, supone un ahorro estimado de 819 €. Para un desglose más detallado del presupuesto, revisar el Anexo I (Presupuesto detallado).

## 1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

A continuación se muestra cómo están dispuestos los diferentes capítulos del documento, así como la información que contienen cada uno de ellos:

Capítulo 1: El primer capítulo de este documento detalla el planteamiento general del proyecto. En él se plasma una breve introducción explicando el significado de robótica blanda, así como una explicación acerca de las líneas principales del proyecto. Posteriormente se explican las motivaciones y razones que mueven a la realización de dicho proyecto, y los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización del mismo. En último lugar se especifica

la estructuración de los capítulos del presente documento junto con sus correspondientes contenidos.

Capítulo 2: En este capítulo se explican más detalladamente los fundamentos de la robótica blanda o suave. Para ello se compara brevemente con la robótica tradicional y se comentan algunas de las diferencias entre ellas, así como ventajas y desventajas que presenta, para seguidamente aclarar el significado en robótica de los conceptos de “blando” o “suave” propiamente dichos. Más adelante se exponen los antecedentes o primeros pasos que hicieron posible desarrollo de esta disciplina, y a continuación se explica la tecnología y bases de funcionamiento que emplea este tipo de robótica. Para terminar se comentan los futuros desafíos por desarrollar en la robótica blanda.

Capítulo 3: Aquí comienza la parte práctica del proyecto, donde, tras una breve introducción acerca de esta plataforma de ensayos, se detallan los requisitos y especificaciones necesarios para llevar a cabo el control de este tipo de robots. Seguidamente se explica el diseño del banco de pruebas y se entra en detalle con todos y cada uno de los dispositivos que lo integran. En último lugar se describen la estructura y funcionamiento de las instalaciones eléctrica y neumática de esta plataforma.

Capítulo 4: En este capítulo se continúa con la parte técnica, donde se explican tanto el software y microcontrolador utilizados, como las acciones de adquisición de datos y control empleadas en el proyecto. Para ello se realizan lecturas de presión y deflexión del robot mediante un sistema de visión. Seguidamente se da una descripción acerca del modelo físico del actuador sobre el que se realizan los diferentes ensayos, y se describe el programa de control desarrollado explicando las distintas opciones que integra. En cuanto al control, se realizan varias estrategias de control de presión positiva y presión negativa, que serán explicadas en detalle. Por último se hace un análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 5: En el quinto capítulo se entra en detalle con los actuadores sometidos a estudio, realizando una descripción de los mismos acerca de su estructura y modo de funcionamiento. Se da una explicación más detallada sobre el actuador Pneunets y diferentes ensayos a los que ha sido sometido, y una descripción más general sobre la pinza de tres dedos y el actuador Jamming. A continuación, se comentan los resultados y sensaciones que demuestran tras ser sometidos a estudio.

Capítulo 6: Para finalizar, en el último capítulo, se comentan las conclusiones generales adquiridas durante el desarrollo de todo el proyecto y las futuras líneas de investigación y posibles futuros trabajos sobre este proyecto.



## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA BLANDA

Los robots tradicionales, o industriales, llevan entre 30 y 40 años bien situados en el sector industrial, desarrollando una gran variedad de tareas tales como fabricación, montaje, pintura o almacenamiento [7]. Estos robots están formados en gran medida por eslabones, articulaciones y motores como principales elementos mecánicos. Usando este tipo de elementos y componentes rígidos, ha permitido obtener sistemas robóticos precisos, rápidos, y relativamente fáciles de controlar, normalmente mediante instrucciones desde un punto de vista secuencial, donde es vital conocer la situación y posición del robot para acometer la siguiente orden [8]. Esto les hace muy fiables y precisos en tareas programadas y repetitivas desarrolladas a velocidades muy elevadas, pero a la hora de desenvolverse en entornos cambiantes o al manejar objetos frágiles y con formas irregulares, muestran varias carencias debido a la dureza de sus materiales o a la limitada adaptabilidad de sus estructuras al ambiente que les rodea [9] (ver figura 2.1.).



**Figura 2.1.** Curiosity [10].

Tras largos años de investigación, parece acercarse el momento en el que los robots no sólo se dediquen única y exclusivamente a la industria, sino que utilicen todo su potencial en tareas más cercanas al ser humano y a la sociedad. Esta opinión no es sólo compartida por el mundo de la investigación, sino también por la industria de la robótica, donde cada vez se producen más robots de servicio para un consumo generalizado. Por tanto, no cabe duda que este tipo de robots no enfocados a la industria debe reunir unas características de funcionamiento, morfología y seguridad completamente distintas a las de los robots industriales [11].

Las nuevas generaciones de robots de servicio no pueden depender únicamente de estructuras rígidas, cuyo sistema de funcionamiento y seguridad está basado exclusivamente en la estrategia de control, de la misma forma que los robots industriales. La morfología, las propiedades de los materiales que lo componen, y el entorno, son factores muy importantes que

las nuevas aplicaciones demandan a la hora de diseñar robots con características de versatilidad, adaptabilidad, eficiencia y seguridad.

De hecho, muchas de las nuevas características de los robots no son solo consecuencia directa de un sistema de control avanzado, sino de nuevas ideas en cuanto a la morfología del robot. Para conseguir esto es necesario un diseño físico en función del entorno y del tipo de interacción que el robot tendrá con dicho entorno, de forma que sus propiedades físicas faciliten su comportamiento [8].

Una propiedad que puede jugar un papel importante en esta robótica es la elasticidad. Los nuevos robots, conocidos como blandos, están parcial o totalmente formados por materiales que poseen una gran capacidad de deformación elástica, principalmente fluidos, geles, polímeros blandos y otros materiales fácilmente deformables [12].

En una primera aproximación, el término robótica blanda se empleó para denominar a aquellos robots cuya morfología era poco convencional. Posteriormente, hizo referencia a los robots convencionales que habían sido modificados para mantener la seguridad debido a que mantenían zonas de trabajo comunes con los seres humanos [8]. En la actualidad, la robótica blanda o suave consiste en la fabricación de robots poseen un alto grado de flexibilidad y elasticidad debido a las características químicas de sus materiales. De esta manera se sobreponen en ciertos aspectos a la robótica tradicional y adquieren así unas propiedades aventajadas como una mayor seguridad a la hora de interactuar con el ser humano, adaptabilidad a entornos irregulares y desconocidos, bajo coste y fácil producción, y una gran variedad y personalización en los diseños (ver figura 2.2.).



**Figura 2.2.** Robot blando desarrollado en la Universidad de Harvard [13].

Pero de una forma más técnica y precisa, los términos “blando” o “suave” en cuanto a robótica se refieren son aplicables a aquellos robots hechos con materiales cuyo módulo de Young está dentro del orden de magnitud de  $10^2 - 10^6$  Pa, lo que equivale a un intervalo de 3 a 10 veces más blandos que los robots tradicionales [14].

Una de las grandes ventajas de la robótica blanda es la simplificación en cuanto a la programación y a las estrategias de control utilizadas. Debido a su morfología deformable y totalmente adaptable al entorno que le rodea, en la mayoría de los casos el robot no necesita

conocer su estado anterior ni dónde se encuentra, simplemente le basta con actuar adaptándose a su entorno y sin preocuparse de dañar al objeto con el que está interactuando.

En la Tabla 1 se puede observar una comparativa sobre las características de diferentes tipos de robots dependiendo de su dureza y rigidez:

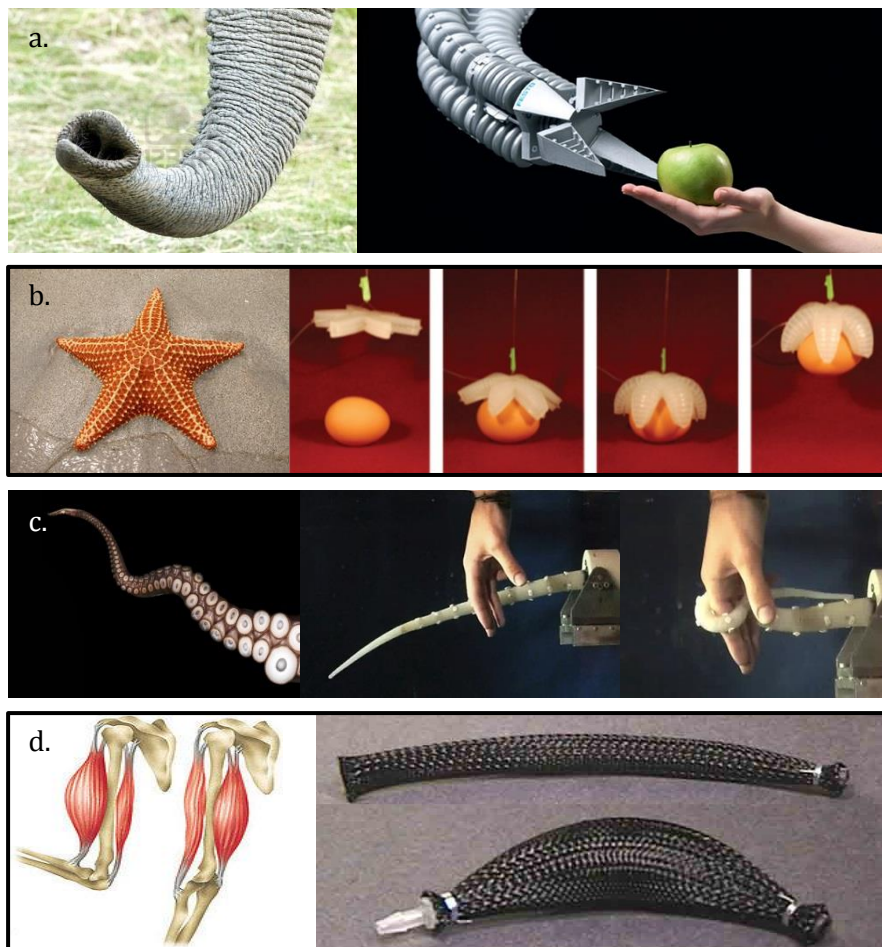
**Tabla 2.1.** Características de los diferentes tipos de robots dependiendo de su dureza [15].

Características de diferentes tipo de robots dependiendo de su dureza				
	Rígido	Discreto hiperredundante	Duro continuo	Blando
<b>Propiedades</b>				
Grados de libertad	Pocos	Muchos	Infinitos	Infinitos
Actuadores	Pocos, discretos	Muchos, discretos	Continuos	Continuos
Deformación del material	Ninguna	Ninguna	Poca	Mucha
Materiales	Metal, plástico	Metal, plástico	Aleación con memoria	Gomas, polímeros electroactivos
<b>Capacidades</b>				
Precisión	Muy alta	Alta	Alta	Baja
Capacidad de carga	Alta	Más baja	Más baja	La más baja
Seguridad	Baja	Baja	Baja	Alta
Destreza	Baja	Alta	Alta	Alta
Entorno de trabajo	Estructurado	Estructurado y desestructurado	Estructurado y desestructurado	Estructurado y desestructurado
Manipulación de objetos	Forma fija	Forma variable	Forma variable	Forma variable
Adaptación a obstáculos	Ninguna	Buena	Buena	La más alta
<b>Diseño</b>				
Control	Fácil	Medio	Difficil	Difficil
Planificación de trayectorias	Fácil	Difficil	Difficil	Difficil
Detección de posición	Fácil	Difficil	Difficil	Difficil
Inspiración	Extremidades de mamíferos	Serpientes, peces		Hidrostatos musculares

## 2.2. INVESTIGACIÓN Y PRIMEROS PASOS DE LA ROBÓTICA BLANDA

En los últimos años, se ha convertido en una práctica muy común el que los científicos y los ingenieros busquen soluciones en diferentes estudios biológicos. Al mismo tiempo, la investigación científica sirve como plataforma de ensayos para diferentes hipótesis biológicas que hay que someter a ensayo [16].

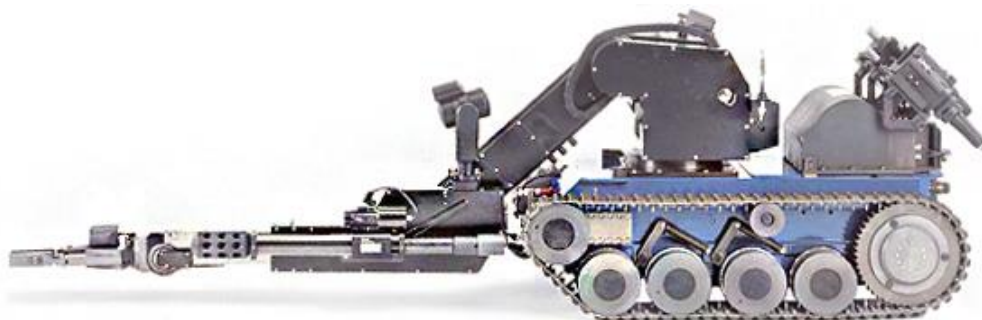
De aquí surge esa inspiración biológica que impulsa la robótica blanda, ya que en el mundo orgánico, los materiales blandos y flexibles cobran una gran importancia tanto en la mecánica animal como en la humana. El estudio de cómo los seres vivos utilizamos nuestra fisonomía para desenvolvern en entornos complejos e impredecibles ha llevado a la ciencia a desarrollar diseños basados en estos comportamientos.



**Figura 2.3.** Robots blandos inspirados biológicamente. (a) Robot Festo imitando a la trompa de un elefante [17]. (b) Actuador con forma de estrella de mar [18]. (c) Robot inspirado en el tentáculo de un pulpo [19] [20]. (d) Músculo artificial [21].

En la figura 2.3.a. podemos observar un diseño de Festo, donde imita a la trompa de un elefante. Utilizando aire a presión, diferentes cavidades de plástico varían su forma y tamaño, consiguiendo así un gran rango de movimientos y dimensiones. En el extremo posee una pinza deformable con la que se consigue agarrar objetos [22]. En la figura b., se muestra un actuador en forma de Estrella con el que es posible sujetar diferentes objetos. Aunque las estrellas de mar no usan sus extremidades para agarrar objetos, su morfología ha servido de inspiración para desarrollar una pinza capaz de sujetar objetos frágiles sin dañarlos, como puede ser un huevo crudo [23]. La imagen c. muestra el tentáculo de un pulpo y un actuador inspirado en él. Este hidrostato muscular artificial está compuesto por silicona y cables, imitando de esta manera los movimientos de este cefalópodo [24]. Por último, en la figura d. se observa un músculo neumático artificial o PAM (Pneumatic Artificial Muscle). Mediante aire a presión se consiguen desarrollar fuerzas considerables manteniendo la elasticidad y flexibilidad deseadas [25] [26].

Sin embargo la idea de robots blandos y flexibles no solo surge de la inspiración biológica. Un peso importante en la investigación de esta tecnología lo ha llevado el ejército de los Estados Unidos, quien perseguía la idea de un robot blando capaz de moverse en cualquier terreno. Esto fue debido a que los anteriores diseños de robots empleados en la búsqueda de minas y artefactos explosivos tenían serias limitaciones de movilidad en cuanto a su rigidez e incapacidad de adaptación en terrenos irregulares [27] (ver figura 2.4.).



**Figura 2.4.** Teodor, robot militar [28].

Otra razón por la que el ejército americano ha querido invertir en la robótica blanda ha sido la de querer desarrollar un exoesqueleto capaz de aportar habilidades adicionales a sus soldados. Este traje, al contrario de lo que se podría pensar, no trata de blindar ni armar al soldado, sino de proporcionarle unas características extra, tales como fuerza y resistencia. Esto se consigue mediante un exoesqueleto formado por músculos artificiales neumáticos [29].

Una labor importante de investigación la llevó a cabo la Universidad de Harvard. Allí, el grupo de investigación Whitesides desarrolló un robot de cuatro patas hecho de silicona, capaz de caminar al inyectarle aire a presión de manera secuencial en diferentes partes de su cuerpo. Esto supuso un hito importante en el desarrollo de esta tecnología y fue un momento en el que numerosos miembros de la comunidad científica decidieron dar el paso y sumarse a la investigación de la robótica blanda [30].

## 2.3. TECNOLOGÍA DE LOS ROBOTS BLANDOS

Todos los robots blandos siguen en su mayoría la misma composición, la cual consta de un cuerpo deformable normalmente blando en el que reside la capacidad de comportarse como actuador o como sensor. Para ello, los robots blandos responden básicamente a dos principios de funcionamiento: la circulación de una corriente eléctrica o campo eléctrico, o la circulación de un fluido por su interior [8].



### 2.3.1. ACTUADORES

Una de las ventajas de la robótica blanda es que gracias a que es tan abierta y admite una gran variedad de combinaciones, los resultados que se pueden obtener son innumerables. Esto se puede observar en la amplia gama y variedad de actuadores que podemos encontrar. Estos funcionan, explicado a grandes rasgos, de dos formas posibles: mediante la circulación de una corriente eléctrica a través de una zona específica del actuador, o inyectando un fluido a presión en alguna cavidad.

#### 2.3.1.1. Actuadores eléctricos blandos

A su vez, este mismo grupo de actuadores activados eléctricamente se puede dividir en dos familias:

- **Polímeros electroactivos (EAPs):**

Los polímeros electroactivos son una de las formas más populares de fabricación de músculos artificiales. Tienen varias ventajas sobre otros actuadores como son la fácil fabricación, bajo consumo de energía, generación de fuerzas de gran magnitud en comparación con su peso, seguridad y funcionamiento silencioso [31].

El principio de funcionamiento es básicamente el de un condensador, donde una fina capa de elastómero actuando como material dieléctrico es situada entre dos electrodos. Cuando a estos electrodos se les aplica una diferencia de potencial, estos actúan sobre el elastómero deformándolo y modificando de esta manera la forma del actuador. Al eliminar la tensión en los electrodos el actuador recupera su forma natural [32] (ver figura 2.5.).

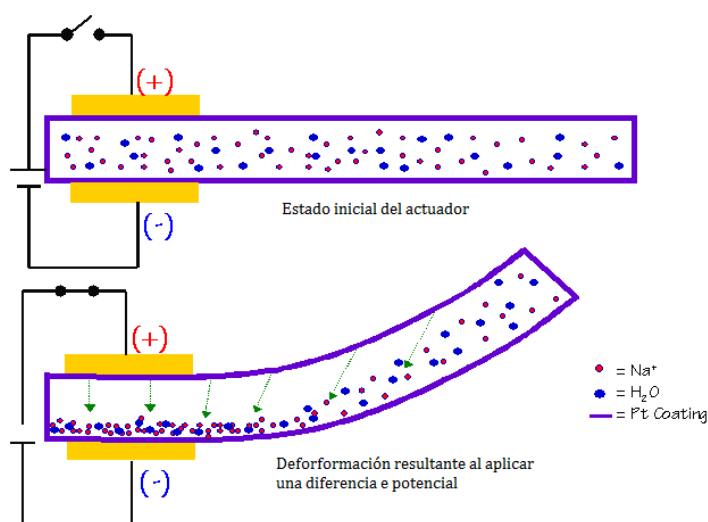


Figura 2.5. Principio de funcionamiento de un polímero electroactivo [33].

- **Aleaciones con memoria (SMAs):**

Las aleaciones con memoria de forma son aleaciones metálicas con una singularidad, que es la capacidad de recuperar su forma inicial tras haber sufrido una deformación debido a un cambio de temperatura [34]. Estos actuadores poseen ventajas como pueden ser una buena relación fuerza-peso o un bajo coste, pero cobran bastante importancia algunos de sus inconvenientes. Los dos más importantes son la considerable histéresis que se produce entre las fases de calentamiento y enfriamiento, y las altas temperaturas necesarias para deformar muchas de estas aleaciones, llegando algunas de ellas a alcanzar más de 1000°C de temperatura [35].

### 2.3.1.2. Actuadores neumáticos blandos (SPAs)

Estos son uno de los actuadores robóticos blandos más extendidos y populares en la actualidad, siendo elegidos en gran número de aplicaciones robóticas blandas gracias a su alto grado de personalización, ligereza y la seguridad que presenta a la hora de interactuar con los seres humanos [36].

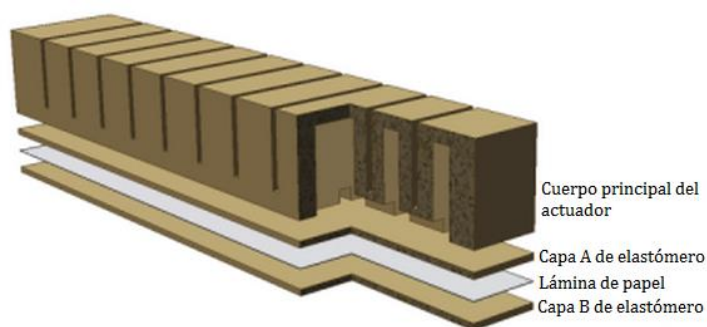
Formados en su mayoría por goma, silicona o elastómeros, son usados en medicina, donde su versatilidad y seguridad son necesarias en espacios reducidos, así como en terapias de rehabilitación. También son utilizados en labores de rescate y exploración gracias a su capacidad para desenvolverse en espacios desordenados e irregulares [37].

En la mayoría de estos actuadores, el funcionamiento consiste en un cuerpo blando, formado por algún material elástico y flexible como puede ser algún tipo de goma u elastómero, y en cuyo interior se encuentran una o varias cavidades llenas de aire. Al inyectar un fluido a presión como puede ser aire o algún otro gas en dichas cavidades, el cuerpo se deforma adquiriendo una nueva morfología según sea su diseño. Tras eliminar dicha presión en el interior del actuador, éste vuelve de nuevo a su estado inicial. Esto hace posible que un actuador neumático blando que pese menos de 15g sea capaz de desarrollar una fuerza superior a 30 veces su propio peso [38].

Estos son algunos de los ejemplos de actuadores neumáticos blandos:

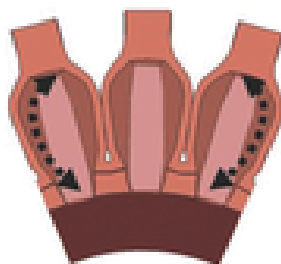
- **Pneunets:**

Este actuador consiste en una serie de cavidades dispuestas en línea en el interior de un elastómero. Estas cavidades a su vez están interconectadas entre ellas a través de un canal, formando así un volumen único. Bajo estas cavidades, y ocupando la superficie de la base del actuador, se sitúa una lámina de un material inelástico, como puede ser el papel (ver figura 2.6.).



**Figura 2.6.** Estructura del actuador Pneunets [26].

Al inyectar aire a las cavidades del actuador, estas se inflan haciendo que el cuerpo de este se dilate. Pero debido a la lámina de papel bajo las cavidades de aire, el actuador no se expande axialmente, sino que se dobla [26] (ver figura 2.7.).



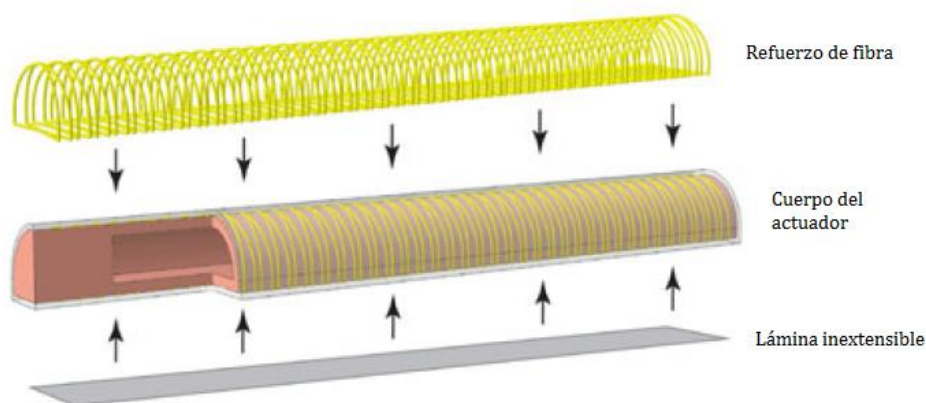
**Figura 2.7.** Cavidades interiores del actuador Pneunets [26].

La naturaleza del actuador puede variar al modificar su geometría. Así, cavidades de distinto volumen o paredes de diferente grosor afectarán a la expansión del actuador. De igual manera, su fabricación con otros materiales también afectará a su comportamiento. Es interesante resaltar la facilidad de fabricación de estos actuadores, su peso ligero, y el movimiento no lineal que proporcionan. Por el contrario requieren un flujo de gas alto y una fabricación minuciosa debido a las posibles burbujas de aire que pueden surgir durante este proceso, las cuales deteriorarán su funcionamiento [37].

#### - **Actuador blando reforzado con fibra:**

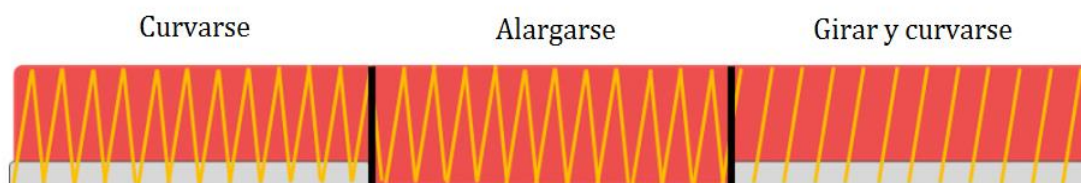
Un actuador blando reforzado con fibra se trata de un actuador neumático cuyo principio de funcionamiento se basa en el aire a presión. Este actuador consiste en una combinación de elastómeros y materiales inextensibles. Comparado con otros diseños existentes de actuadores neumáticos blandos geométricamente complicados, este actuador posee una geometría tubular simple que ofrece una fácil fabricación y donde sus fibras pueden ser colocadas de diferentes formas a lo largo de su cuerpo, consiguiendo así diferentes tipos de movimientos. Además, al igual que el anterior actuador, se puede añadir una lámina inextensible a lo largo de su base para conseguir que se doble [14] (ver figura 2.8.).





**Figura 2.8.** Estructura del actuador blando reforzado con fibra [26].

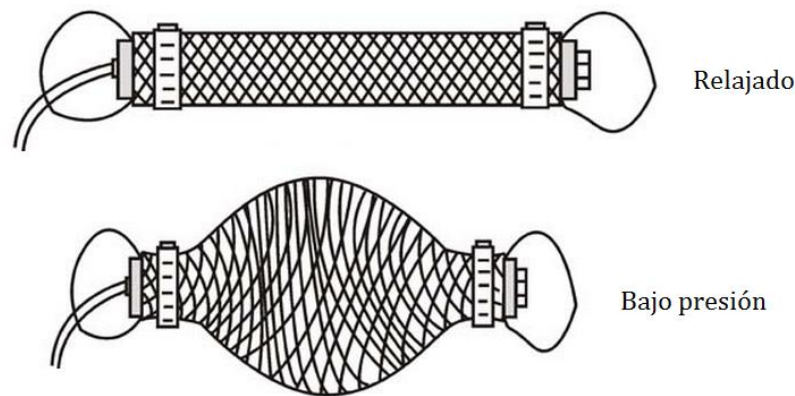
Variando la disposición de las fibras así como la lámina inextensible se pueden conseguir distintos tipos de movimientos. De esta manera el actuador puede doblarse, alargarse o girar en torno a sí mismo. A lo largo de un mismo actuador las fibras y la lámina inextensible se pueden configurar de diferentes maneras de forma que con un solo actuador se consigan distintos movimientos. Del mismo modo, diferentes configuraciones de fibras se pueden dar a la vez en el mismo punto del actuador, consiguiendo así dos tipos de movimientos simultáneamente [26] (ver figura 2.9.).



**Figura 2.9.** Diferentes tipos de disposición de la fibra a lo largo del actuador [26].

#### - **Músculos neumáticos artificiales:**

Este actuador consiste en un tubo o cámara inflable dentro de una malla trenzada y ambos sujetos en los extremos. Cuando la cámara interior es sometida a presión y se expande, la geometría de la malla desarrolla una acción de compresión, traduciendo la expansión radial en una contracción lineal [26] (ver figura 2.10.).



**Figura 2.10.** Músculo artificial en relajación y contracción [26]

Estos actuadores son extremadamente ligeros debido a la composición de sus materiales, y pueden transmitir la misma cantidad de energía que los cilindros neumáticos, ya que operan en rangos similares de presión y volumen. Es por ello que cada vez están siendo más utilizados en robots móviles [25].

Algunas de las características de estos actuadores son las siguientes:

- Gran relación potencia-peso, del orden de 1kW/kg.
- Una relación fuerza-desplazamiento variable a gas constante, lo que le hace más similar al comportamiento de un músculo.
- Funcionamiento ajustable, dependiendo de la compresibilidad del gas y de la relación fuerza-desplazamiento.
- Contracción máxima del 50% de su longitud inicial.
- Ausencia de fricción e histéresis.
- Habilidad de funcionar en un amplio rango de presiones, que hace que genere fuerzas de distintas magnitudes.
- La posibilidad de conexión directa a una unión mecánica [39].

### 2.3.2. SENSORES

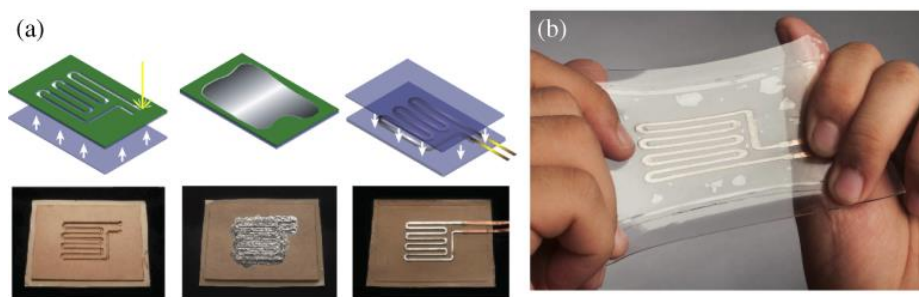
Los sensores blandos, al contrario que los actuadores, están bastante menos desarrollados y aún les queda una larga labor de investigación. Debido a la escasa variedad de esta tecnología, muchos robots encuentran como solución incorporar pequeños sensores integrados distribuidos a lo largo de su cuerpo. Algunos de los sensores blandos que se emplean son los siguientes:

#### - Sensores EGaIn:

Estos sensores están formados por microcanales flexibles en cuyo interior se encuentra una aleación metálica de Galio e Indio. Estos microcanales forman un circuito con una determinada resistencia. Cuando la geometría de estos canales cambia, la resistencia del circuito también lo

hace. La medición de esta variación de resistencia es posible extrapolarla a la tensión a la que están sometidos los canales en el momento que varía su geometría.

Estos microcanales se encuentran integrados en una estructura blanda elástica, generalmente compuesta por silicona o algún elastómero, de forma que al sensor se le pueda someter a una tensión, deformándolo, y de esta manera variando la resistencia de los canales [26] (ver figura 2.11.).

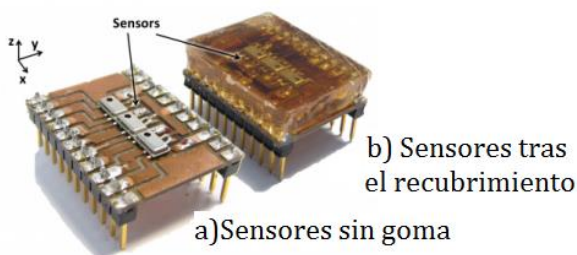


**Figura 2.11.** Estructura del sensor EGaln [26].

#### - Sensores TakkTile

Se trata de sensores baratos, altamente sensibles y sencillos de fabricar basados en barómetros microelectromecánicos (barómetros MEMS). Estos barómetros son capaces de medir presiones en el rango de 1gr a decenas de gramos.

Estos sensores TakkTile consisten simplemente en el recubrimiento con goma de estos pequeños barómetros, de forma que estos pequeños barómetros incorporen a su estructura un recubrimiento blando [40] (ver figura 2.12).



**Figura 2.12.** Sensor TakkTile con y sin goma [40].

## 2.4. DESAFÍOS SOBRE LA ROBÓTICA BLANDA

La robótica cada vez se encuentra más presente en la sociedad, creciendo el uso de diferentes tipos de robots entre los seres humanos. Esto genera la necesidad de desarrollar robots con los que el ser humano pueda interactuar garantizando plenamente su integridad física, y donde una de las soluciones es la utilización de materiales blandos para la creación de estos robots. Esta tecnología todavía se encuentra en una etapa de crecimiento, cuyos esfuerzos principales están actualmente invertidos en la exploración e investigación de materiales poco convencionales, siguiendo la línea de materiales “blandos”, y su posible implementación en sistemas robóticos.

La robótica blanda, de alguna manera, también está generando metodologías y un conocimiento científico que contribuye a un mejor entendimiento de la inteligencia de la naturaleza. En este sentido, este es uno de los retos de la robótica blanda, el seguir comprendiendo y entendiendo cómo funcionan los sistemas biológicos que proporciona la naturaleza, para después poder aplicar dichos conocimientos usando la tecnología conocida.

En un aspecto más técnico, esta debe seguir creciendo e investigándose. Como se ha visto anteriormente, es una tecnología que incorpora escasas posibilidades a la hora de desarrollar sensores y mecanismos de medida, lo cual es objetivo de mejora e investigación. No obstante es una disciplina que lleva al descubierto pocos años, por lo que cabe esperar que en los próximos años su crecimiento está asegurado.

## 3. BANCO DE CONTROL

### 3.1. INTRODUCCIÓN

A la hora de controlar un robot o un actuador blando, se necesita una determinada tecnología. No se requieren engranajes mecánicos, altas tensiones, ni motores eléctricos, ya que su funcionamiento, como se ha explicado con anterioridad, es totalmente distinto. De esta manera, la acción de control a llevar a cabo ha de realizarse sobre uno de los dos principios básicos de funcionamiento de la robótica blanda: el control de una corriente eléctrica o campo electromagnético; o el control de un fluido.

En este caso la idea ha sido la de desarrollar una plataforma de ensayos para la evaluación de robots blandos accionados neumáticamente. Este banco de pruebas está inspirado en el diseño llevado a cabo por el laboratorio de diseño biológico de la Universidad de Harvard, donde desarrollaron una placa de control neumático para actuadores blandos [26].

Con ello se pretende lograr el manejo de actuadores mediante el control de un fluido a presión, en este caso aire. Esto se ha conseguido mediante el desarrollo de un banco de pruebas con dispositivos alimentados a +5 y +24V, y conectado a un ordenador mediante el que se manejará el software de control. El banco consta de una base sobre la cual es posible colocar diferentes actuadores robóticos con el fin de someterlos a distintos ensayos.

Durante el desarrollo de este capítulo se detallarán las especificaciones y requisitos que caracterizan la forma y funcionamiento de este banco de ensayos. Se explicará el diseño que se ha llevado a cabo para la fabricación del banco y se comentará uno a uno todos los dispositivos que lo integran, explicando su funcionamiento y la labor que desempeñan. Por último se dará una visión general sobre las instalaciones electrónica y neumática que forman los distintos elementos del banco y se explicarán sus respectivos funcionamientos.

### 3.2. REQUISITOS

El banco de control desarrollado es una plataforma hardware concebida para el control de actuadores neumáticos blandos, tales como los actuadores Pneunets, actuadores reforzados con fibra o músculos artificiales, y adquisición de datos de sensores blandos. El objetivo es la fabricación de un prototipo como herramienta de pruebas para evaluar y analizar el funcionamiento de los actuadores neumáticos mediante su control y toma de datos.

Esta herramienta, al tratarse de un sistema de control para robots y actuadores de diferentes formas y estructuras, ha de ser adaptable y configurable para diseños con características muy diferentes entre ellos.

En este sentido, y llevando a cabo una labor de investigación de una manera más técnica sobre el funcionamiento de los robots blandos, se recogió información y características necesarias para el desarrollo de este banco de control. Requisitos necesarios para el control de esta tecnología y el desarrollo de esta plataforma son:

- Un circuito de potencia para el accionamiento de los robots, que en este caso se tratará de una instalación neumática.
- Un circuito de control que será el encargado de controlar electrónicamente el circuito neumático.
- Un microcontrolador con la capacidad de recibir las señales analógicas y digitales propias de la instalación y ejecutar el software de control pertinente llevando a cabo una acción de control en tiempo real sobre el sistema.
- Como requisitos más específicos de la instalación, son necesarios dispositivos que funcionen dentro de los rangos de presión y caudal en los que opera la robótica blanda. Tras comprobar varios diseños y actuadores existentes, se establece un rango de presiones de 0 a 100 psi. En cuanto al caudal, no se especifica un caudal determinado. Este tipo de actuadores son de pequeño tamaño, por lo que los volúmenes de aire con los que trabajan no requieren un caudal de aire significativo.

### 3.3. DISEÑO

El diseño de este banco de pruebas está pensado de una manera lo más modular y configurable posible. De este modo, los dispositivos y la distribución de los elementos de la placa se pueden modificar según las necesidades requeridas. Esto se ha conseguido utilizando una base de metacrilato con agujeros distribuidos uniformemente sobre toda su superficie separados entre ellos por 2,5 cm, de manera que cualquier dispositivo pueda ser cambiado de lugar cuando sea necesario.

Para que esto sea posible, cada dispositivo del banco va fijado previamente a su placa de metacrilato individual. Dichas placas individuales tienen unas dimensiones determinadas para poder encajar en cualquier región de la matriz de agujeros de la placa base. A su vez estos agujeros sirven para pasar tanto el cableado eléctrico como tuberías neumáticas por debajo del banco, cumpliendo una función estética, de forma que no queden visibles.

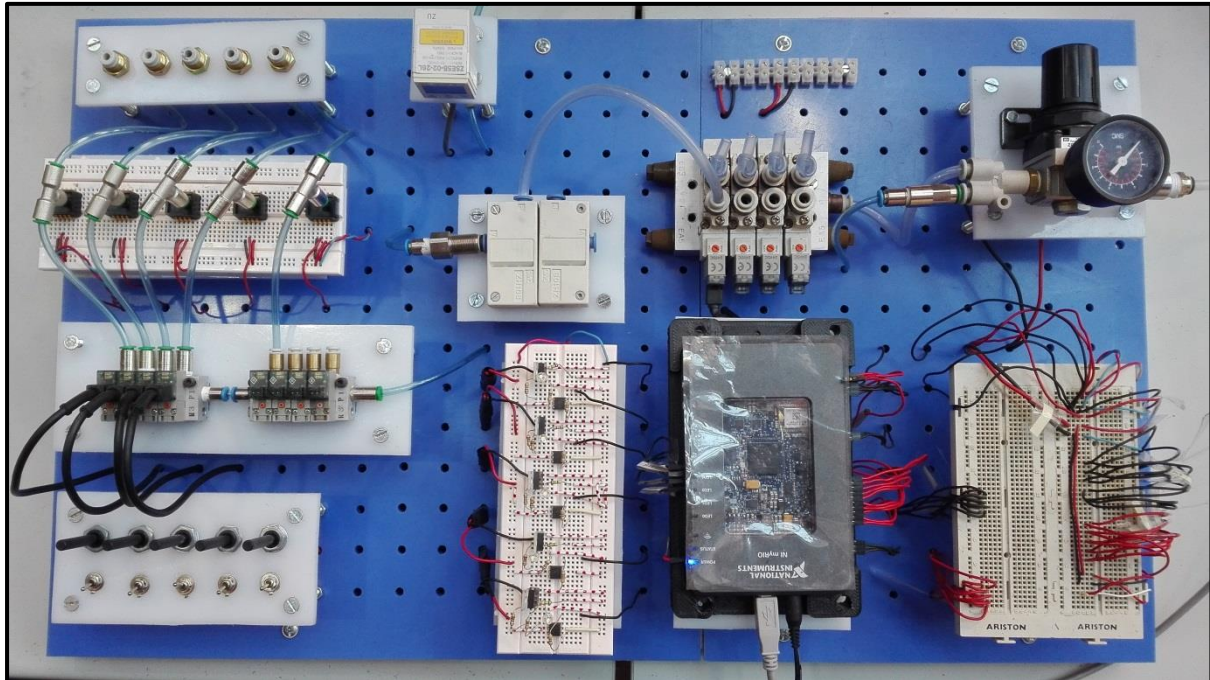
A la hora del diseño del banco de ensayos, se comenzó reuniendo las características y especificaciones necesarias que éste debía cumplir. Una vez conocidos estos requisitos, se procedió a la adquisición de los componentes que pudieran proporcionar dichos requerimientos. Una vez conseguidos los dispositivos, se diseñaron las placas que albergan individualmente a cada componente, y una vez con todas ellas terminados se decidió el tamaño que debía tener la placa principal. Finalmente se fabricó una placa de 67,3 x 40 cm, con espacio suficiente para todos los dispositivos, y espacio libre para futuras modificaciones o mejoras.



Este banco de ensayos, para cumplir con los requisitos necesarios y su función de control, consta de los siguientes elementos:

- Base
- Controlador myRIO
- Manómetro
- Circuito de potencia para las electroválvulas
- Electroválvulas de presión
- Electroválvulas de vacío
- Sensores de presión
- Sensor de vacío
- Switches
- Potenciómetros
- Eyectores
- Placa intermedia de conexiones
- Fuente de alimentación de 24V
- Toma de aire a presión

La siguiente imagen muestra el banco de ensayos y la disposición de todos sus componentes sobre él:



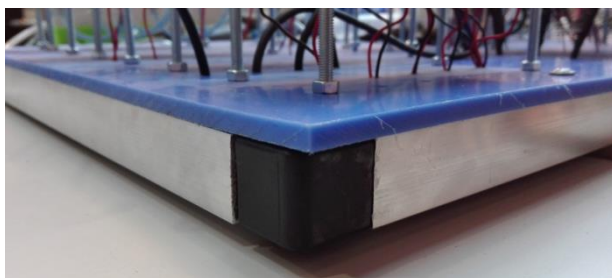
**Figura 3.1.** Banco de ensayos.

Para una vista del banco de ensayos con sus dimensiones y la ubicación detallada de cada dispositivo, ver Anexo II (Plano del banco de ensayos).

### 3.4. MONTAJE

#### 3.4.1. BASE

La base principal del banco está formada por dos piezas de metacrilato para formar el total de la superficie. Una de 40 x 40 cm y otra de 40 x 27,3 cm, formando un total de 40 x 67,3 cm. Como ya se ha comentado anteriormente, esta base presenta una matriz de agujeros sobre toda su superficie, dotándola de mayor versatilidad a la hora de fijar los dispositivos. A lo largo de sus 4 bordes, va fijada sobre unos perfiles de aluminio, lo que hace que la eleven 2,5 cm, de manera que bajo ella se puedan ocultar los cables y tuberías neumáticas necesarios para el funcionamiento del banco.



**Figura 3.2.** Perfiles de aluminio en la base del banco de ensayos.

#### 3.4.2. MANÓMETRO

El manómetro se encarga de regular la presión a la entrada del banco de pruebas. Consta de una llave de paso que abre o corta por completo el flujo de aire, y una rueda que regula la presión a la que deja entrar en el circuito el aire a presión, de manera que ante posibles variaciones de presión en el exterior del banco, el manómetro impide que haya picos de presión que puedan sobrepasar la presión deseada en el interior del circuito. El manómetro admite una presión máxima de 140 psi, superando de esta forma la presión máxima con la que trabaja el banco de ensayos.



**Figura 3.3.** Manómetro.



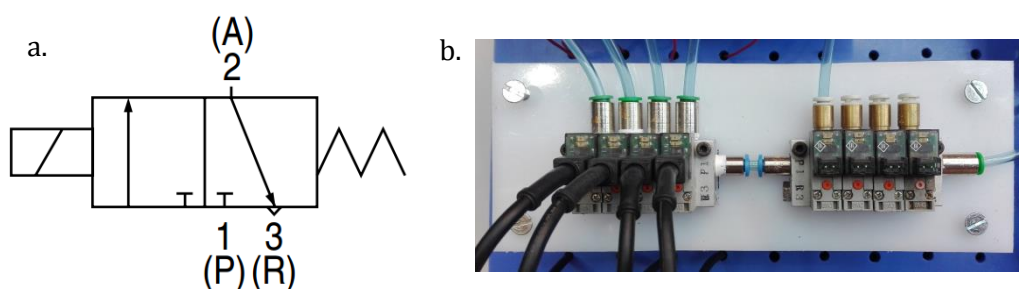
### 3.4.3. ELECTROVÁLVULAS

Al tratarse de un banco de ensayos diseñado para el control tanto de presión positiva como de vacío, éste utiliza dos tipos distintos de válvulas, una para cada tipo de control. Se han instalado un total de 12 válvulas (8 para presión positiva y 4 para vacío), pero el diseño neumático y electrónico del banco de ensayos ha sido diseñado para activar únicamente 5 válvulas de forma simultánea. Conseguir un mayor número de válvulas trabajando conjuntamente sería posible modificando la instalación electrónica y ampliando el circuito neumático.

#### 3.4.3.1 Electroválvulas para el control de presión positiva

Estas electroválvulas se encargan de abrir y cerrar el flujo del aire que le llega al actuador neumático cuando se desea realizar un control de presión positiva. Las válvulas van conectadas directamente al manómetro, el cual determina la presión a la que el aire atravesará las válvulas.

Se tratan de unas válvulas SMC SY114. Estas son electroválvulas de 2 posiciones y 3 vías, normalmente cerradas, con un rango de presión de funcionamiento de 0 a 0,7 MPa, es decir, más de 100 psi. Una de sus limitaciones es el caudal que admiten, el cual no supera los 11,78 l/min (normal-litros por minuto). Esto no supone un gran inconveniente, ya que las aplicaciones que serán controladas con el banco de pruebas no poseen grandes volúmenes, por lo que no requieren flujos de aire muy caudalosos.

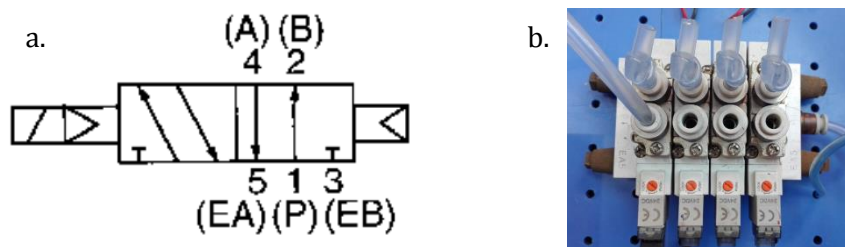


**Figura 3.4.** Electroválvulas SY114. (a) Símbolo neumático de las válvulas SY114. (b) Válvulas SY114 sobre el banco de ensayos

#### 3.4.3.2. Electroválvulas para el control de vacío

Las electroválvulas para el control de vacío no formaban parte del diseño inicial del banco de ensayos. Al realizar pruebas de vacío, se pudo comprobar que las válvulas SY114, debido a su limitado caudal, no conseguían presiones lo suficientemente bajas como para llegar a la presión negativa deseada. Por ese motivo se optó por integrar en el banco otras válvulas SMC de la serie

SY5120. De esta forma se puede llegar a conseguir caudales de más de 600 NI/min, alcanzando así el vacío deseado en mucho menos tiempo. Estas son unas válvulas de 5 vías y dos posiciones, también capaz de soportar presiones de trabajo de hasta 0,7 MPa.



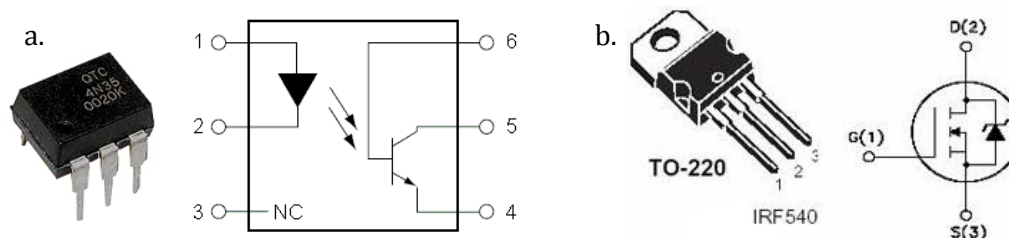
**Figura 3.5.** Electroválvulas SY5120. (a) Símbolo neumático de las válvulas SY5120. (b) Válvulas SY5120 sobre el banco de ensayos

#### 3.4.4. CIRCUITO DE POTENCIA PARA LAS VÁLVULAS

Ambos bloques de válvulas funcionan con una tensión de alimentación de 24 V, lo que supone una corriente alta en comparación con el resto de componentes electrónicos del banco. Para evitar posibles fugas de altas corrientes a elementos del circuito con corrientes de funcionamiento más bajas, se ha diseñado un circuito óptico de manera que el accionamiento de las válvulas quede aislado físicamente.

Esto se consigue mediante un circuito con optoacopladores. Un optoacoplador es un dispositivo que utiliza una corriente eléctrica para encender un led, el cual satura un fototransistor, por el que presumiblemente circulará una corriente colector-emisor mucho mayor. A su vez, la corriente que circule por este fototransistor servirá para excitar la puerta de un transistor MOSFET de potencia, el cual, al saturarse, activará la electroválvula.

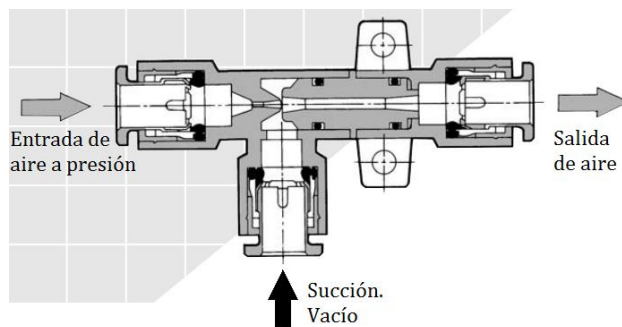
El funcionamiento detallado de este circuito eléctrico será explicado más adelante en este mismo capítulo, en el apartado 3.5 (Instalación eléctrica).



**Figura 3.6.** Optoacoplador y MOSFET. (a) Optoacoplador 4N35M y su circuito eléctrico. (b) MOSFET IRF540 y su simbología.

### 3.4.5. EYECTORES

Los eyectores son los dispositivos encargados de crear el vacío. Estos funcionan aplicando el principio de Venturi. Se hace circular aire por una tobera principal. Al llegar a una zona donde la tobera presenta un diámetro menor, se generará una zona de baja presión. Este punto, conectado a una segunda tobera, succionará el aire de dicha segunda tobera, generando así el vacío deseado.



**Figura 3.7.** Sección longitudinal del eyector y su funcionamiento.

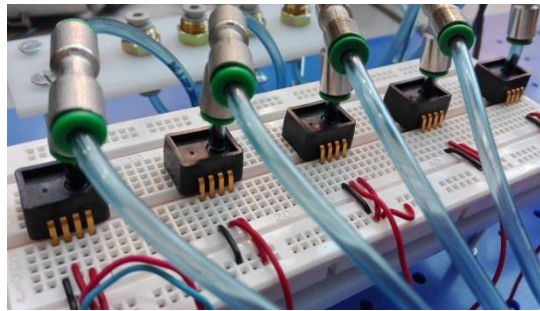
Los eyectores instalados en el banco de ensayos son el modelo SMC ZH10B, capaces de conseguir una presión de -88 kPa con respecto a la presión atmosférica, vacío suficiente para las aplicaciones de control del banco.



**Figura 3.8.** Eyectores sobre el banco de ensayos.

### 3.4.6. SENSORES DE PRESIÓN

El banco consta de 5 sensores de presión. Estos se tratan del modelo ASDX AVX100PG AA3 de Honeywell. Son capaces de medir una presión máxima de 100 psi, y generan una señal analógica de 0 a 5 V dependiendo de la presión que estén midiendo. Esta señal, que va conectada al microcontrolador, permite medir la presión interna de los actuadores, y mediante un algoritmo de calibración, se extrapola a la escala de 0-100 psi.



**Figura 3.9.** Sensores de presión conectados al circuito neumático.

### 3.4.7. SENSOR DE VACÍO

El sensor para medir la presión negativa se trata de un sensor diferencial que mide 0 psi a presión atmosférica. En este punto, el sensor es capaz de medir un rango de presiones de -100 a 100 kPa, de decir de -14,5 a 14,5 psi. Este sensor posee una pantalla donde muestra la presión actual que está midiendo y a su vez proporciona una salida analógica de 0 a 5 V.

Para su calibración, se fueron registrando medidas desde los 0 psi (presión atmosférica para el sensor) hasta la máxima presión negativa que se pudo alcanzar con las válvulas del banco de ensayos, que fueron -12,6 psi. Al mismo tiempo se fueron anotando los valores de tensión que proporcionaba el sensor para cada valor de presión. Al graficar los valores, se obtuvo una recta bajo la ecuación  $y = 7,2477x + 13,693$ . De esta manera es posible trabajar en tiempo real con los valores de presión que registra el sensor.



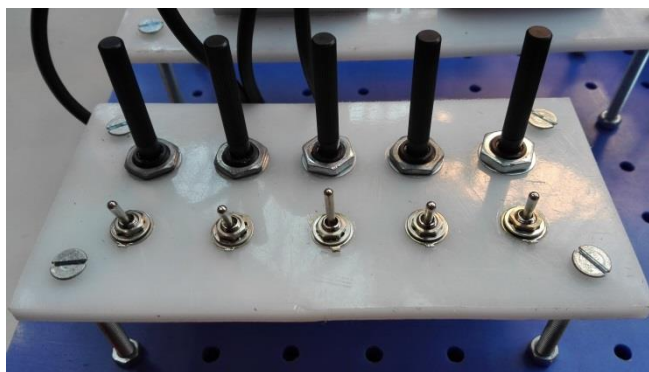
**Figura 3.10.** Sensor de vacío sobre el banco de ensayos.

### 3.4.8. RACORES Y TUBOS NEUMÁTICOS

Los racores son las conexiones que utilizan los distintos dispositivos neumáticos para acoplar las tuberías. El banco de ensayos utiliza distintos tipos de racores como racores automáticos roscados o en forma de T y de diferentes medidas dependiendo del tubo a conectar. Las medidas de los tubos utilizados son de 4, 6 u 8 mm de diámetro exterior.

### 3.4.9. SWITCHES Y POTENCIÓMETROS

El banco de ensayos cuenta con una placa donde se han instalado 5 potenciómetros y 5 switches para facilitar el control de los actuadores que se sometan a ensayo. De esta forma con los switches se pueden activar y desactivar válvulas, y con los potenciómetros es posible regular la presión del aire que circula por ellas. Estos potenciómetros van alimentados a 5 V, de manera que el microcontrolador recibe de ellos una señal en el rango 0-5 V. Dependiendo de si se trata un control de presión positiva o de vacío, los potenciómetros tendrán una calibración u otra para traducir ese rango de tensión a presión.



**Figura 3.11.** Switches y potenciómetros del banco de control.

### 3.4.10. CONTROLADOR MYRIO

El controlador myRIO es un dispositivo hardware embebido de National Instruments que se encarga de ejecutar el software de control alojado en su memoria sobre los dispositivos de entrada y salida a los que está conectado. Este dispositivo será explicado con más detalle en el apartado 4.2. (Sistema myRIO y LabVIEW).



**Figura 3.12.** Microcontrolador myRIO.

### 3.4.11. OTROS DISPOSITIVOS

#### 3.4.11.1. Fuente de alimentación 24V

Los dispositivos del banco de ensayos deben ser alimentados a una determinada tensión, y no todos funcionan con la misma alimentación, sin contar el myRIO que lleva su propio transformador conectado a la red eléctrica, de manera que el banco cuenta con distintos puntos de alimentación. Una de estas tensiones es 5 V que proporcionan varias salidas del myRIO. Otra de las tensiones es 3,3 V, también proporcionada por el microcontrolador. La última tensión es de 24 V, que alimenta a las válvulas y al sensor para el vacío, y para la cual e necesita una fuente de alimentación.



**Figura 3.13.** Fuente de alimentación de 24V.

#### 3.4.11.2. Toma de aire a presión

Un compresor proporciona aire a presión para el funcionamiento del banco de ensayos. Este compresor genera presión y aire suficientes para toda la nave donde se encuentra este



proyecto. En particular el banco de ensayos va conectado a una toma de aire a presión que sale del compresor. Esta toma de aire consta de una llave de paso para regular el flujo de aire, el cual llega al manómetro del banco donde es medida su presión y puede volver a ser ajustado.



**Figura 3.14.** Toma de aire a presión.

### 3.5. INSTALACIÓN ELÉCTRICA

La instalación eléctrica se encarga de alimentar a todos los dispositivos eléctricos del banco de ensayos y conectarlos al microcontrolador. Los dispositivos eléctricos del banco constan de una tensión de alimentación (5 o 3,3 V proporcionados por el myRIO, o 24 V proporcionados por la fuente de alimentación para las válvulas y el sensor de vacío) y de una señal que va conectada al microcontrolador para poder actuar sobre ellos o recibir su información. A lo largo de este apartado se mostrará el esquema eléctrico de los componentes del banco de ensayo señalando cómo van alimentados y conectados.

#### 3.5.1. ESQUEMA ELÉCTRICO DE LAS VÁLVULAS Y SU CIRCUITO DE ACTIVACIÓN

Para la activación de las válvulas se ha diseñado un circuito de activación con el fin de aislar físicamente al microcontrolador, ya que éstas funcionan a una tensión y corriente mayores. Con esto se consigue proteger al myRIO de algún pico de tensión o alguna posible fuga de corriente. Este circuito de activación consta, por cada electroválvula, de un optoacoplador 4N35M, un transistor MOSFET IRF540 y resistencias de distintos valores. Se han instalado 5 circuitos como este para la activación simultánea de hasta 5 válvulas. En la siguiente imagen se muestra el circuito eléctrico de activación para una de las electroválvulas con sus correspondientes cálculos:

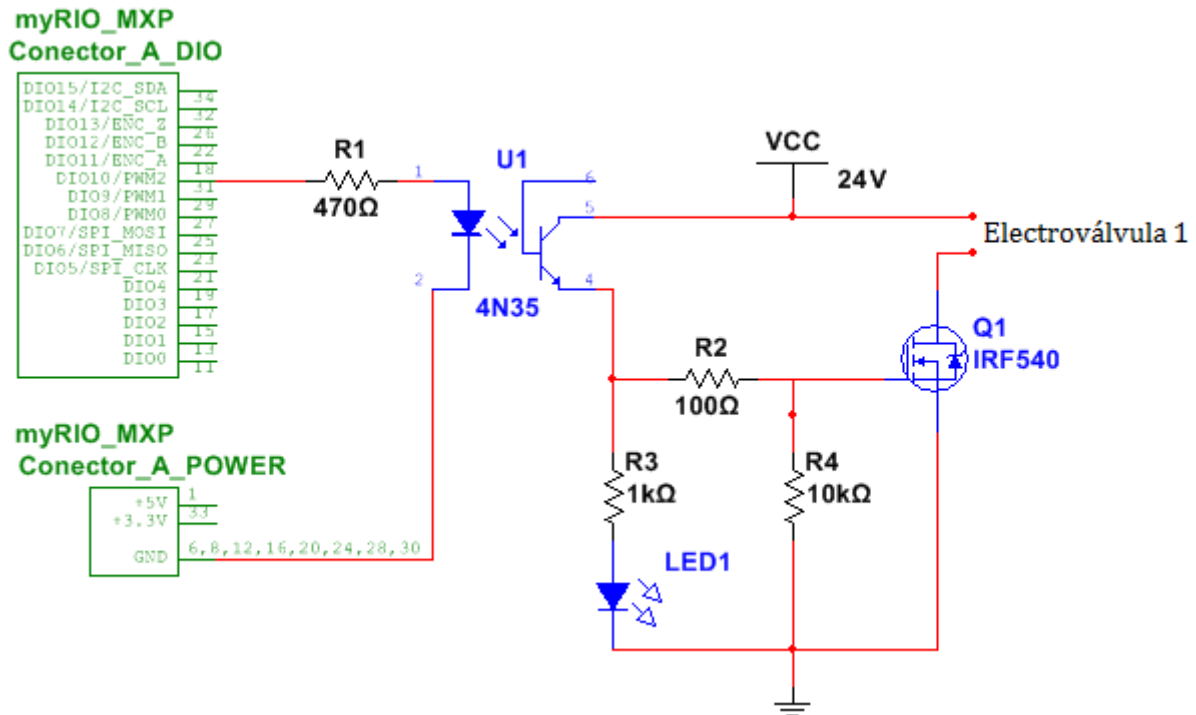


Figura 3.15. Circuito eléctrico de protección del microcontrolador y activación de las electroválvulas.

- Cálculo de  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{V_+ - V_F}{I_F} = \frac{3,3 \text{ V} - 1,18 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 212 \Omega \rightarrow \text{Finalmente se opta por } R_1 = 470 \Omega$$

- Cálculo de  $R_3$ :

$$R_3 = \frac{V_{CC} - V_{CE(SAT)} - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{24 \text{ V} - 0,3 \text{ V} - 2 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 1,085 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{Tras probar } R_3 = 1 \text{ k}\Omega, \text{ se decide aumentarla a } 10 \text{ k}\Omega \text{ para reducir el brillo del LED1.}$$

- Cálculo de  $R_2$  y  $R_4$ :

$I_{GS} = 100 \text{ nA} \approx 0 \text{ mA}$ . Se diseña un divisor de tensión por el que fluya una corriente similar a la del led. Por tanto  $R_2 = 100 \Omega$  y  $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$ , de manera que:

$$V_{GS} = R_3 \frac{V_{CC} - V_{CE(SAT)}}{R_2 + R_4} = 10 \text{ k}\Omega \frac{24 - 0,3}{100 \Omega + 10 \text{ k}\Omega} = 23,46 \text{ V}$$

En el circuito se puede observar que al aplicar una señal en la salida digital del myRIO, éste genera una corriente que ilumina el led del optoacoplador, haciendo conducir de esta manera al transistor BJT de su interior. Cuando esto ocurre, llega corriente a la puerta del MOSFET IRF540N, de manera que se satura y se activa la electroválvula.



### 3.5.2. ESQUEMA ELÉCTRICO DE LOS POTENCIÓMETROS Y SWITCHES

Los 5 potenciómetros y los 5 switches van situados en la misma placa dentro del banco de ensayos. Todos presentan una alimentación común de 5 V y una tierra también común a todos ellos. A su vez, cada uno va conectado a un pin del myRIO. En concreto, los potenciómetros están conectados a una entrada analógica, proporcionando de esta manera una señal de 0 a 5 V, y los switches a una entrada digital.

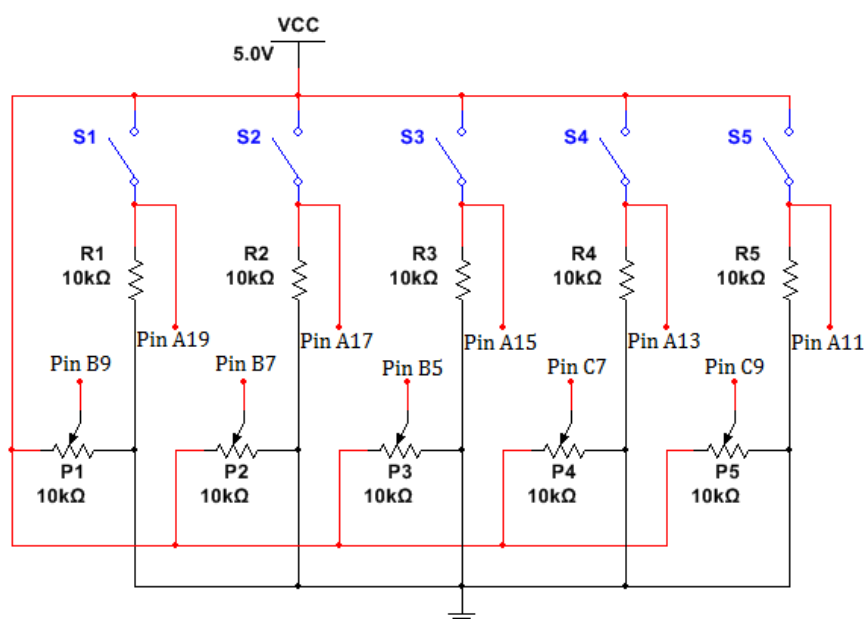


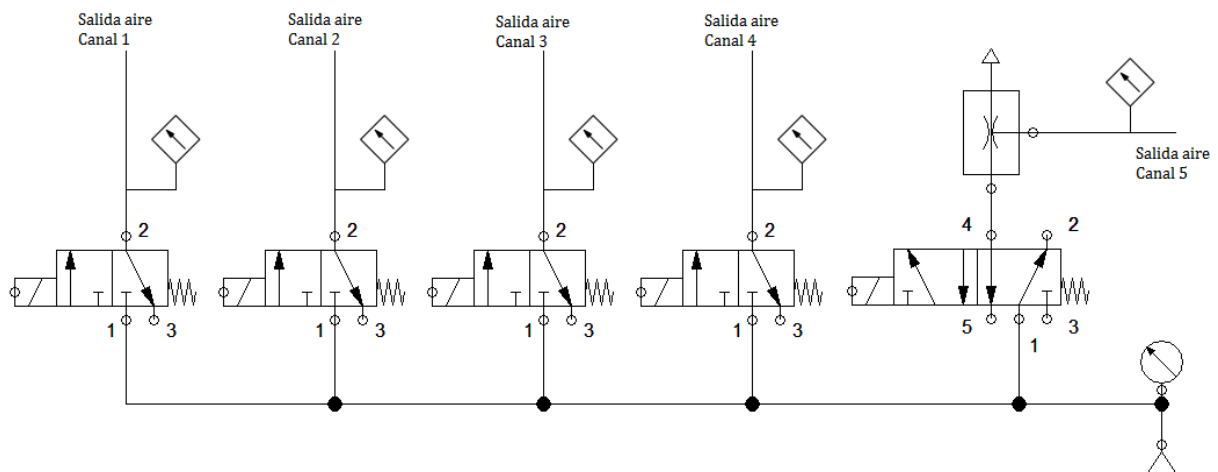
Figura 3.16. Circuito eléctrico de los switches y potenciómetros.

## 3.6. INSTALACIÓN NEUMÁTICA

El banco de ensayos está diseñado para regular y controlar hasta un máximo de 5 salidas de aire simultáneamente, aunque consta de un total de 12 válvulas disponibles para futuras modificaciones. Estas válvulas están organizadas en bloques, de manera que hay 2 bloques, cada uno con 4 válvulas de 3 vías y 2 posiciones, y un tercer bloque con 4 válvulas de 5 vías y 2 posiciones.

El banco recibe aire de la toma de aire a presión proveniente del compresor. El aire, al llegar al banco de ensayos, pasa por el manómetro donde se regula la presión con la que trabajará el banco. A continuación, el aire se distribuye a las electroválvulas dependiendo del montaje neumático con el que esté trabajando el banco. Todas las válvulas van conectadas a un sensor de presión, de manera que se pueda medir y controlar la presión a la salida de cada válvula.

En la siguiente imagen se muestra la configuración neumática más común del banco de ensayos. Se pueden observar 4 válvulas 3/2 (de 3 vías y 2 posiciones) conectadas al manómetro, y cada una de ellas con un sensor de presión a su salida. Una quinta válvula, en este caso 5/2, también conectada al manómetro, y que en su salida presenta un eyector. Cuando la electroválvula se activa, el aire atraviesa el eyector longitudinalmente, mientras que en la tobera lateral se crea un vacío que es medido mediante el sensor de presión negativa.



**Figura 3.17.** Instalación neumática general.

## 4. ADQUISICIÓN Y CONTROL

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Con el banco de pruebas terminado, se pretende desarrollar aplicaciones para la evaluación de distintos actuadores blandos. Para ello, previamente se realizan pruebas y calibraciones de todos los elementos del banco de ensayos para asegurar su correcto funcionamiento.

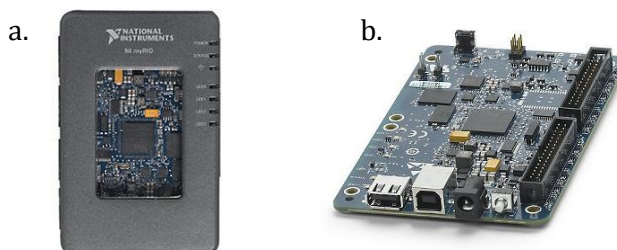
Una vez realizadas las comprobaciones, se desarrolla un software que permite controlar y examinar los comportamientos de distintos actuadores blandos. Mediante un sistema de visión se evaluarán sus comportamientos y se observarán las deformaciones y deflexiones que experimentan. De igual manera se llevará a cabo la regulación y el control de la presión a la que son sometidos.

### 4.2. SISTEMA MYRIO Y LABVIEW

Para el control del banco de ensayos se escogió u unidad central de procesamiento myRIO de National Instruments. El NI myRIO es un dispositivo de hardware embebido enfocado a la enseñanza, que permite diseñar sistemas de ingeniería complejos y reales de manera rápida y económica. Por medio de sus componentes internos, acceso a software transparente y biblioteca de recursos y tutoriales, NI myRIO es una herramienta ideal para ingeniería de control, robótica, mecatrónica y sistemas embebidos [41].

NI myRIO está equipado con una FPGA Xilinx Zynq y procesador ARM Cortex-A9 donde es posible programar E/S personalizadas e implementar procesamiento en tiempo real en un dispositivo de manera rápida y eficaz.

Esta potente tecnología combinada con un acelerómetro interno, LEDs programables, E/S de audio, hasta 40 líneas de E/S digital, 10 canales de entrada analógica, 6 salidas analógicas y un puerto USB y WiFi interno para la conectividad de dispositivos USB ayudan a la creación de una gran variedad de proyectos [41].



**Figura 4.1.** Microcontrolador myRIO. (a) Microcontrolador myRIO con carcasa exterior. (b) FPGA del myRIO [41].

Para que todo ello sea posible, la programación de la FPGA se ha llevado a cabo con el entorno gráfico de programación LabVIEW. NI LabVIEW es un entorno de desarrollo diseñado con una sintaxis de programación gráfica que facilita visualizar, crear y codificar sistemas de ingeniería, LabVIEW es una potente herramienta para el desarrollo de proyectos de regulación y control, donde reduce notablemente los tiempos de pruebas y garantizando la conexión con un gran número de dispositivos [41].

Esta tecnología, al no tratarse de un tipo de lenguaje de programación tradicional basada en un código con reglas sintácticas y semánticas que definen su estructura y el significado de sus expresiones, utiliza dos entornos relacionados entre sí para el desarrollo de sus programas:

- **El panel frontal:** este es la interfaz gráfica con la interacciona el usuario cuando el programa se ejecuta. De manera que se podría considerarse un tipo de programación orientada a objetos Aquí el programador puede diseñar controles para manejar los actuadores del proyecto y colocar gráficas e indicadores que reciban los datos que registran los sensores.
- **El diagrama de bloques:** este entorno es el que lleva el peso de la programación. Aquí se desarrollaron los algoritmos y el código que hace funcionar el programa. Al igual que en otros lenguajes de programación, se pueden desarrollar bucles, funciones (VI's), y cualquier tipo de algoritmo para operar con los objetos del panel frontal [42].

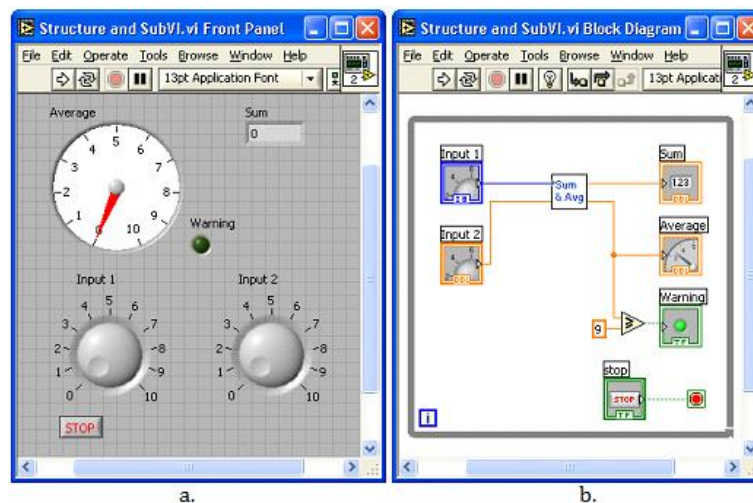


Figura 4.2. LabVIEW. (a) Panel frontal. (b) Diagrama de bloques [43].

### 4.3. ADQUISICIÓN DE DATOS

El banco de ensayos consigue desarrollar una acción de control gracias a las mediciones y la adquisición de información que realiza sobre los actuadores blandos sometidos a ensayo, obteniendo de esta manera la información necesaria para poder aplicar una respuesta precisa sobre ellos.

Estas mediciones son la lectura de presión en el interior del actuador y la curvatura o deformación que el actuador presenta al someterle bajo presión.

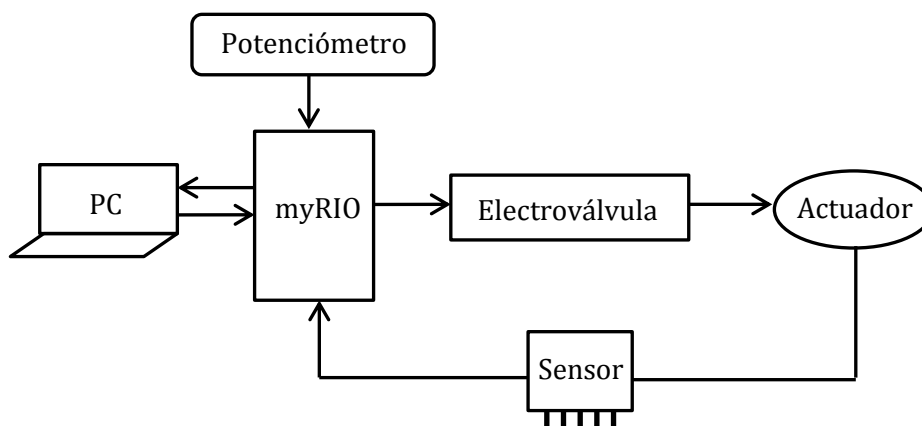
#### 4.3.1. PRESIÓN

El banco de pruebas está diseñado para medir tanto presión positiva como presión negativa (vacío). El procedimiento para la adquisición de esta magnitud varía en función del tipo de presión que se trate, ya que varían tanto los sensores empleados para medir el valor de presión como la calibración de la señal recibida.

##### 4.3.1.1. Presión positiva

El sensor encargado de medir la presión positiva funciona en un rango de 0 a 100 psi de presión absoluta y consta de dos orificios: el primero conectado al actuador y el segundo constantemente a presión atmosférica a fin de proporcionar la presión manométrica. El sensor consta de una salida de 0 a 5 V, de manera que cuando el actuador se encuentra en reposo, el sensor manda a la entrada analógica del microcontrolador una señal analógica de 0 V, y a medida que la presión aumenta en el actuador, la señal del sensor también aumenta hasta un máximo de 5 V para 100 psi.

Para poder trabajar de una forma más clara e intuitiva, el programa de control transforma en tiempo real la señal de 0 a 5 V que recibe el microcontrolador a unidades de presión (psi, bar y kPa). Esto se realiza mediante un algoritmo de calibración facilitado por el fabricante [44] realizando una serie de operaciones sencillas en LabVIEW (ver figura 4.3.) (ver ecuación 4.1.).



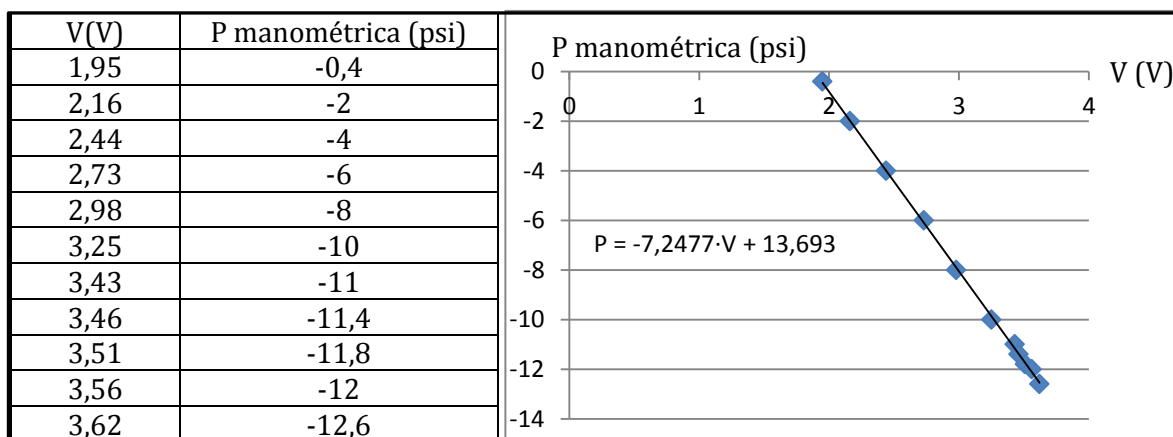
**Figura 4.3.** Flujo de información en el sistema de control.

$$P_{medida} = (V_{out} - 0,10V_{CC}) \frac{P_{MAX} - P_{MIN}}{0,8V_{CC}} + P_{MIN} \quad (1)$$

#### 4.3.1.2. Vacío

La adquisición de información sobre el nivel de vacío en el interior del actuador a controlar es muy similar a la medición de presión positiva descrita en el apartado anterior. El sensor de vacío registra la presión en el actuador y manda una señal de 0 a 5 V a la entrada analógica del myRIO. Para la medición de esta presión, el sensor trabaja en un rango de -100 a 100 kPa de presión manométrica (-14,5 a 14,5 psi). De la misma forma que el caso anterior, el programa ejecutado por el microcontrolador transforma esa señal de tensión en presión, de manera que el usuario pueda trabajar de forma más sencilla.

Para este caso, el sensor de vacío SMC ZSE5B-02-26L no consta de ninguna ecuación ni algoritmo para ajustar la tensión, por lo que esto tuvo que hacerse manualmente. El sensor cuenta con un display en el que aparece el valor de presión que está midiendo en cada momento. Con ello, fueron registrando varios valores de presión en el actuador y las tensiones a las que corresponde cada valor. Esto dio lugar a una serie de puntos, que al situarlos sobre el plano se obtuvo una recta con su ecuación característica con la que poder convertir cualquier valor de tensión a presión (ver figura 4.4.) (ver ecuación 4.2.).

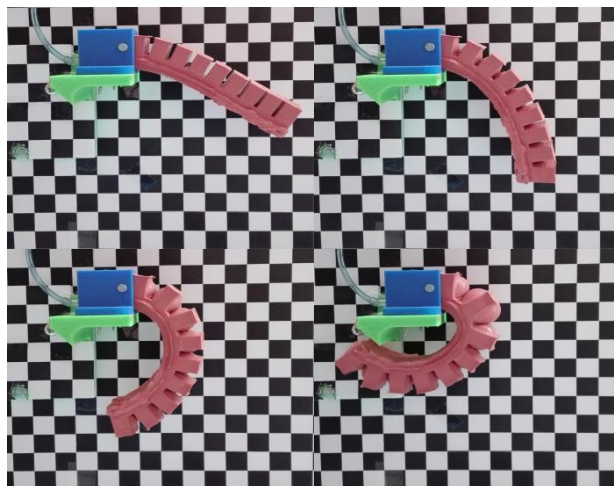


**Figura 4.4.** Toma y representación de datos para la calibración del sensor de vacío

$$P = -7,2477 \cdot V + 13,693 \quad (2)$$

### 4.3.2. DEFORMACIÓN

Con la calibración para obtener presión en tiempo real realizada, es posible medir la deformación en el actuador para diferentes presiones. Para ello se fija el actuador Pneunets en una plataforma y se le somete a diferentes presiones, midiendo el desplazamiento en su extremo (ver figura 4.5.).



**Figura 4.5.** Actuador Pneunets bajo diferentes presiones

Se establecen dos referencias en el actuador. La primera es el extremo que va fijado a la plataforma de ensayos, y la segunda se trata del extremo libre del actuador. Estas referencias son ubicadas en un mapa de coordenadas cartesianas de forma que el extremo fijo será la coordenada  $(0,0)$  y el extremo libre del actuador será una coordenada "P" que variará su ubicación en el mapa dependiendo de la presión (ver figura 4.6.).



**Figura 4.6.** Coordenadas en el actuador para medir la deformación.

Mediante un sistema de visión se recopila información sobre la deformación del actuador, comparando la distancia entre el punto "P" y el origen de coordenadas. Esto dará lugar a varios puntos distintos sobre el plano, cada uno en función de una presión distinta. Uniendo los puntos se obtiene la curva característica del actuador que define su deformación en función de la presión. Estos resultados son presentados en apartado 5.2. (Actuador Pneunets).



#### 4.4. MODELO DE ACTUADOR A SOMETER A ENSAYO

Antes de explicar en detalle el sistema y las estrategias de control utilizadas, en este apartado se da una breve descripción del modelo mecánico del actuador sobre el que se realizarán los diferentes ensayos, el cual se trata de un actuador Pneunets.

El objetivo principal a la hora de evaluar este actuador reside en el control de la presión en su interior. Su principio de funcionamiento comparte gran similitud con los actuadores neumáticos tradicionales [45] como son los cilindros. Mediante la ley de la conservación de la energía se puede establecer que:

$$dW_{entrada} = dW_{salida} \quad (3)$$

Donde  $dW_{entrada}$  (variación de trabajo de entrada al actuador) y  $dW_{salida}$  (variación de trabajo de salida del actuador) equivalen a:

$$dW_{entrada} = (P - P_{atm})dV \quad (4)$$

$$dW_{salida} = -Fdx \quad (5)$$

De tal forma que:

$$(P - P_{atm})dV = -Fdx \quad (6)$$

El actuador Pneunets, al tratarse de un actuador neumático blando, no presenta un desplazamiento lineal, sino que realiza un movimiento de torsión, doblándose sobre sí mismo . De esta manera, el modelo para el actuador quedaría [45]:

$$(P - P_{atm})dV = -\tau d\theta \quad (7)$$

Donde  $\tau$  es el momento de fuerza que desarrolla el actuador y  $d\theta$  el desplazamiento angular que tiene lugar en él.

## 4.5. PROGRAMA DE CONTROL

Para tener un completo control sobre el banco de pruebas, se desarrolló un sencillo programa en LabVIEW. El programa consta de una pantalla principal en donde se da la posibilidad de elegir entre varias opciones (ver Anexo III.A. (Pantalla de inicio)).

Una primera funcionalidad del programase trata de la opción “MONITOR”. Esta opción consiste en una pantalla de observación donde se muestran todos los dispositivos con los que cuenta el banco y están conectados al controlador. Estos son las electroválvulas, los sensores de presión, los potenciómetros y los switches. El objetivo de esta pantalla es comprobar que todos estos dispositivos estén bien conectados al banco de ensayos y que el controlador pueda en todo momento tanto leer la señal que recibe de ellos como de activar o desactivar el dispositivo en cuestión si se trata de una salida (ver Anexo III.B. (Pantalla Monitor)).

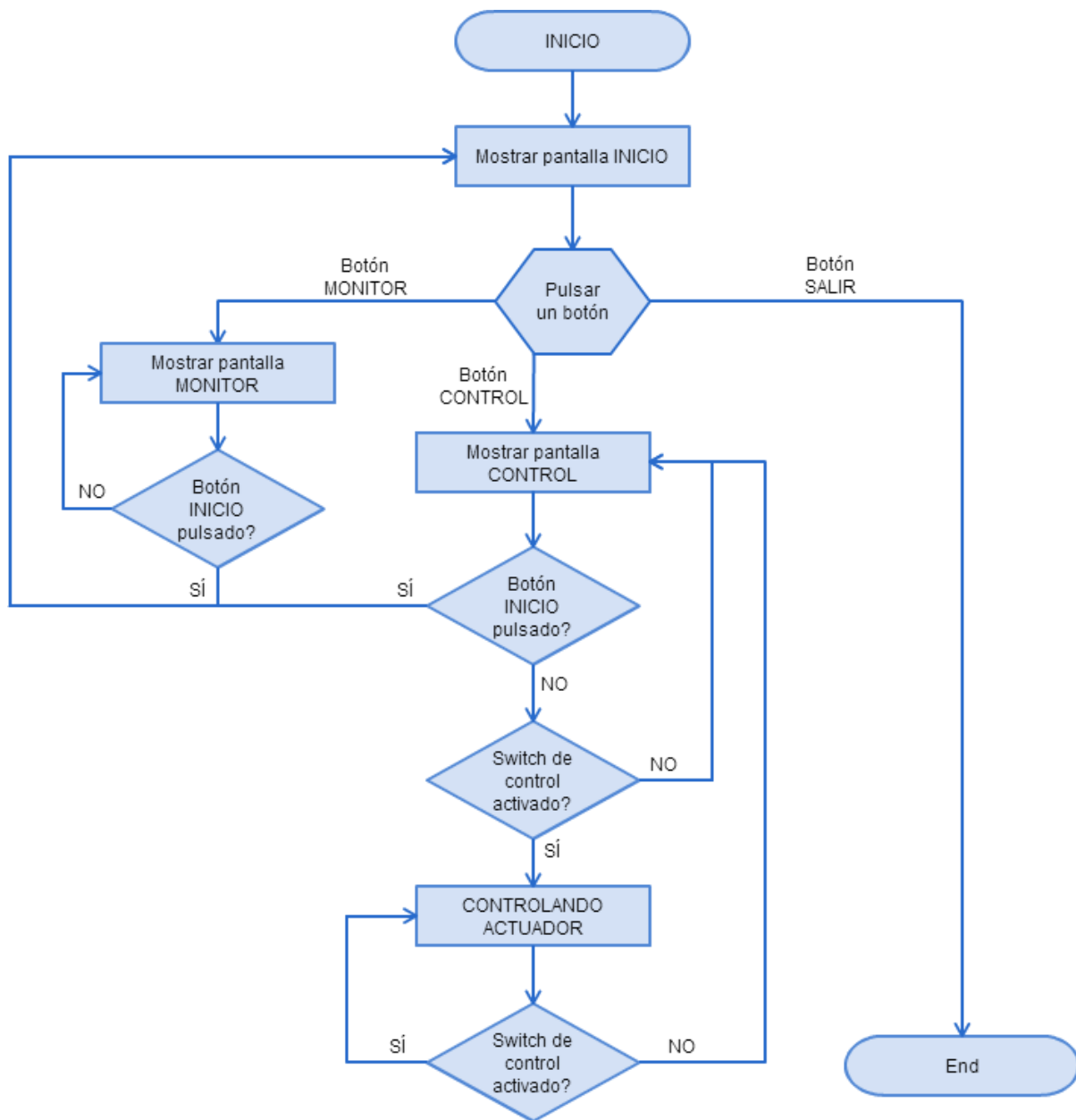
Otra de las opciones que integra el programa, y a la que se puede acceder desde la pantalla principal, es la opción de “CONTROL”. Esta funcionalidad es la opción principal del programa y donde reside todo el sistema de control para actuadores blandos. Esta sección del programa contiene al mismo tiempo en su interior varias pestañas donde se puede seleccionar cuál de los 5 canales de aire del circuito neumático que se va a emplear para el control, pudiendo de esta manera realizar un control de presión positiva o un control de vacío.

Al realizar el control de presión con el programa, este muestra por pantalla en una gráfica en tiempo real el valor de consigna de presión al que se desea ver trabajar al actuador (SP) y la presión real que se encuentra en su interior (PV).

Dentro de este mismo apartado de “CONTROL”, el programa también ofrece una opción que permite controlar el actuador por pantalla. Esto quiere decir que al activar esta opción, se puede modificar el SP del actuador a través de la pantalla en vez de con el potenciómetro del banco de pruebas. Así mismo, el programa también permite modificar por pantalla los parámetros del controlador como son  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  y su rango de salida, y la frecuencia a la que trabajan las electroválvulas. El programa también muestra la salida que el controlador manda a las electroválvulas, que se trata del ciclo útil para la frecuencia a la que estén trabajando estas (ver Anexo III.C. (Pantalla de Control de presión)).

De forma paralela, es posible realizar un control de vacío en un canal distinto de aire a los que se están utilizando para controlar la presión. Esto es posible en la pestaña número 5, dentro de la pantalla “CONTROL” (ver Anexo III.D. (Pantalla de Control de vacío)).

En el siguiente diagrama de flujo se da una visión general sobre la lógica que sigue el programa a medida que el usuario se mueve por las diferentes pantallas y las diferentes opciones que el programa ofrece:

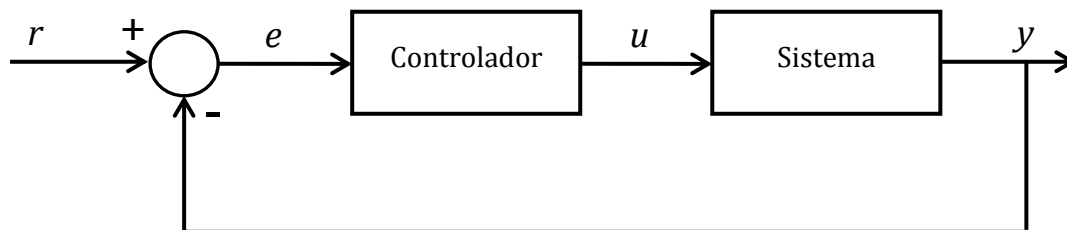


**Figura 4.7.** Diagrama de flujo del programa.

#### 4.6. CONTROL DE PRESIÓN POSITIVA

Para controlar la presión en el actuador, se ha realizado un control PID con modulación de ancho de pulso en las electroválvulas (PWM).

Un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) es una estrategia muy común en control industrial. Se trata de un algoritmo de control en lazo cerrado donde se compara el valor de consigna deseado de una magnitud a controlar con su valor real para poder aplicar una corrección a dicho valor real medido (ver figura 4.8.).



**Figura 4.8.** Flujo de señales en un controlador PID

En la imagen superior se puede observar que “ $e$ ” representa el error existente entre el valor de consigna deseado “ $r$ ” y el valor medido “ $y$ ”. Esto da lugar a una acción de control llevada a cabo por el controlador, el cual aplica una respuesta “ $u$ ” sobre el sistema para corregir dicho error. Esto se consigue aplicando unas acciones proporcional, integral y derivativa sobre el error en el dominio temporal para conseguir la respuesta correctiva que aplicar sobre el sistema:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{e(t)}{dt} \quad (8)$$

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{e(t)}{dt} \right) \quad (9)$$

Estas acciones proporcional, integral y derivativa tienen efectos diferentes sobre el sistema. Un control proporcional ( $K_p$ ) tiene la capacidad de reducir el tiempo de respuesta del sistema ante una variación en la entrada, y también es capaz de reducir pero no eliminar el error en estado estacionario. La acción integral ( $T_i$ ) tiene la capacidad de reducir por completo el error en estado estacionario pero aumenta el tiempo de respuesta del sistema. Por último,  $T_d$  puede aumentar la estabilidad del sistema y consigue reducir la oscilación así como mejorar el tiempo de respuesta [46].

**Tabla 4.1.** Repercusión de los parámetros del PID sobre la señal

	Tiempo de respuesta	Sobreoscilación	Tiempo de estabilización	Error en estado estacionario
$K_p$	Disminuye	Aumenta	Poca variación	Disminuye
$T_i$	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Se elimina
$T_d$	Poca variación	Disminuye	Disminuye	No cambia

En muchas ocasiones en este tipo de control, la respuesta “ $u$ ” que el controlador aplica sobre el sistema toma valores en un rango de 0 a 1, de 0 a 100, de -100 a 100... de forma que el valor de la acción del controlador cambia constantemente. En otros casos se trata de un control ON-OFF, de manera que la respuesta del controlador es 0 o 1, encendido o apagado.

Este último caso es el que tiene lugar para el control de la presión en los actuadores que se evaluarán en el banco de pruebas. Al tratarse de electroválvulas, éstas tienen únicamente 2 posiciones que son abierto o cerrado, de manera que los dos parámetros que han de variar para el control de las electroválvulas son la frecuencia de trabajo y el tiempo que permanecen abiertas en cada ciclo.

Esta forma de regulación con dispositivos ON-OFF se conoce como Modulación de Ancho de Pulso o Pulse Width Modulation (PWM). Esto consiste en fijar una frecuencia de trabajo y a partir de ahí variar el ciclo útil o la proporción de tiempo que estará abierta la electroválvula durante un periodo. De esta manera se consigue una respuesta equivalente a una señal continua [47] (ver figura 4.9.).

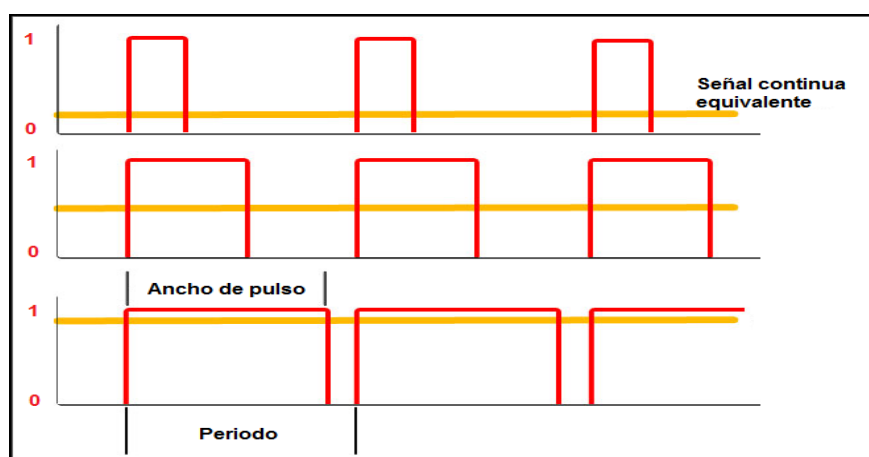
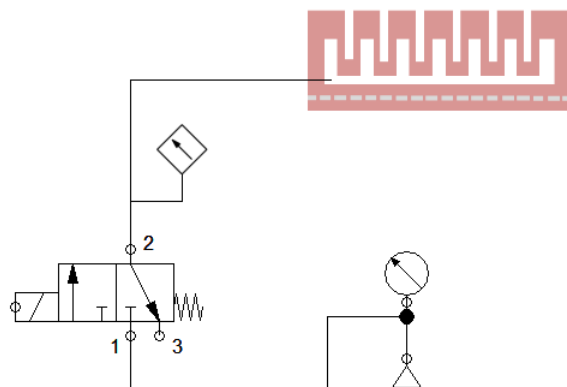


Figura 4.9. Señal equivalente a PWM

Combinando el control PID y la modulación de ancho de pulso, se ha desarrollado una plataforma software con la que, mediante el banco de ensayos, se pretende controlar y evaluar el funcionamiento de los actuadores Pneunets.

#### 4.6.1. SISTEMA PID-PWM CON UNA ELECTROVÁLVULA

Un controlador PID, mediante PWM, llevará a cabo una acción de control sobre el encendido y de la electroválvula SMC SY114, a la que está conectado el actuador Pneunets, con el objetivo de regular la presión en su interior (ver figura 4.10.).



**Figura 4.10.** Circuito neumático para control de un actuador con una válvula

En la imagen superior puede observar una fuente de aire a presión conectada a un manómetro donde se regula la presión del aire que fluye a través de él. Seguidamente se encuentra una electroválvula 3/2 que es la encargada de permitir o bloquear el paso de aire al actuador. Entre la válvula y dicho actuador se encuentra un sensor para medir la presión a la que se encuentra el actuador.

El control de circuito es llevado a cabo por el NI myRIO. En él se ha desarrollado un programa de control con el objetivo de regular y mantener una presión deseada en el interior del actuador, consiguiendo de esta manera el movimiento y funcionamiento del mismo. El programa utiliza 4 entradas/salidas para el correcto control de la presión:

**Tabla 4.2.** Señales de los dispositivos que recibe el myRIO y su función.

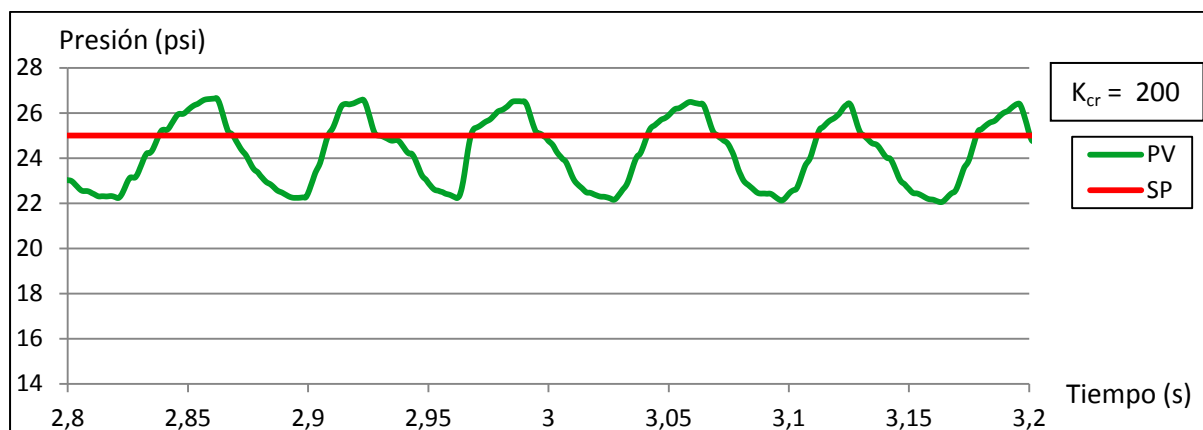
	<b>E/S</b>	<b>A/D</b>	<b>Función</b>
<b>Switch</b>	Entrada	Digital	Activa el programa de control
<b>Potenciómetro</b>	Entrada	Analógica	Establece la presión deseada en el actuador
<b>Electroválvula</b>	Salida	Digital	Permite o bloquea el paso de aire al actuador
<b>Sensor de presión</b>	Entrada	Analógica	Mide la presión en el actuador

El NI myRIO, mediante el control PID, mide el error o la diferencia en cada instante de tiempo entre el valor del potenciómetro (presión de consigna) y el valor del sensor de presión (presión real en el actuador). A esa diferencia, el controlador PID le aplica una acción proporcional, integral y derivativa para corregir ese error. La salida del controlador es una señal en el rango de 0 a 100 que se aplicará sobre la electroválvula. Ésta, al ser un dispositivo digital, únicamente contempla los estados de abierto o cerrado. Es por ello que se emplea la modulación de ancho de pulso para su control. La válvula, trabajando constantemente a una determinada frecuencia, recibirá esa señal de 0 a 100 del controlador, lo que le indicará cuánto tiempo debe permanecer abierta en cada periodo. De esta manera, con la electroválvula trabajando a 100 Hz

y el controlador mandando una señal de salida con valor de 80, para un periodo de 10 ms, la válvula permanecerá abierta 8 ms y se cerrará durante 2 ms, esperando la siguiente señal para aplicarla al siguiente periodo.

La salida del PID, y por tanto la señal PWM varían en cada ciclo de ejecución del programa hasta que la señal de presión medida por el sensor en el interior del actuador se ajuste lo más posible a la presión de consigna deseada. Este ajuste de la presión real a la presión deseada puede ser más rápido o menos rápido, más preciso o menos preciso, en función de los parámetros del PID. Estos ajustes se consiguen variando los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  del controlador.

Una primera aproximación al valor de las constantes se realiza utilizando el método de Ziegler-Nichols para la sintonización de controladores PID. Ziegler y Nichols publicaron en 1942 una investigación donde se describía dos métodos para la sintonización de parámetros de controladores P, PI y PID. Uno de estos métodos se utiliza para sistemas que presenten oscilaciones sostenidas, que es exactamente lo que ocurre en este control de presión al tratarse de una electroválvula abriendo y cerrando continuamente. Para este método, se aplica únicamente una ganancia  $K_p$  (con  $T_i$  y  $T_d$  a 0) con el objetivo de obtener oscilaciones sostenidas. Esta ganancia se llama ganancia crítica ( $K_{cr}$ ), que corresponde a un periodo crítico ( $P_{cr}$ ) [48] (ver figura 4.11.).



**Figura 4.11.** Oscilaciones constantes para una ganancia crítica  $K_{cr}$  con un periodo crítico  $P_{cr}$

En la imagen superior se observa un SP (Set Point o consigna) de 25 psi. Una ganancia crítica  $K_{cr} = 200$  da lugar a continuas oscilaciones en el PV (Present Value o valor medido), obteniendo de esta forma un periodo crítico  $P_{cr} = 0,0685$  s. Con estos dos parámetros se procede a calcular las constantes  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  del controlador según el método Ziegler-Nichols [49] (ver tabla 4.3.).



**Tabla 4.3.** Cálculo de los parámetros del PID en función de  $K_{cr}$  y  $P_{cr}$

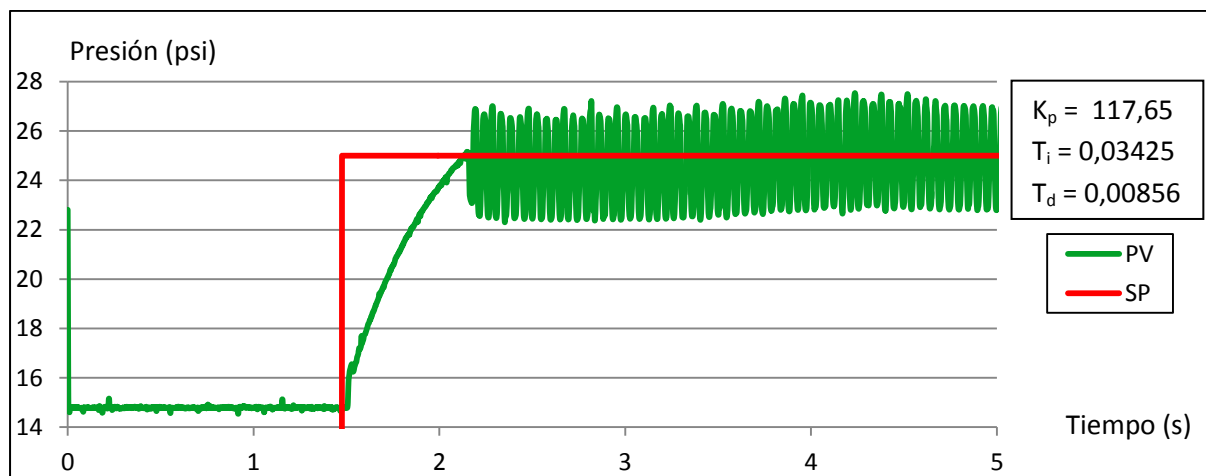
Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0,45K_{cr}$	$0,833P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Esto da como resultado los siguientes parámetros:

**Tabla 4.4.** Resultado de los parámetros del PID con el método Ziegler-Nichols

Parámetro	Valor
$K_p$	117,65
$T_i$	0,03425
$T_d$	0,00856

Introduciendo estos parámetros en el controlador, el sistema muestra la siguiente respuesta ante una entrada escalón de una presión de 25 psi:

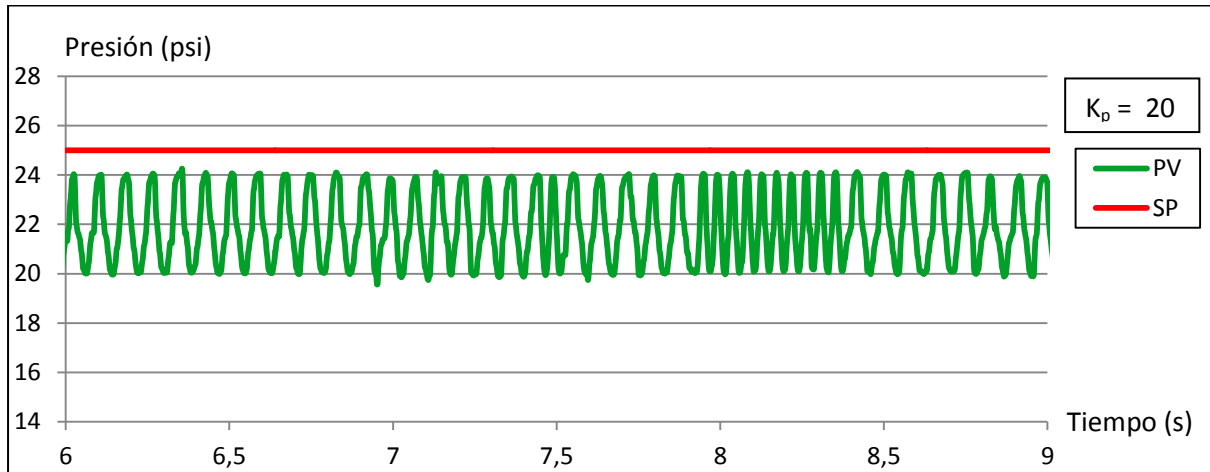


**Figura 4.12.** Respuesta del PID sintonizado con los parámetros calculados por el método Ziegler-Nichols.

Lo primero que se puede observar viendo la figura 4.12 es la rápida respuesta que presenta el sistema, que tarda 65 ms en alcanzar el SP (Set Point o punto de consigna). Cuando el PV (Present Value o valor actual) alcanza el SP, éste comienza a oscilar en torno a él, con picos de hasta  $\pm 2,5$  psi. Esto genera vibraciones en el actuador debido a la constante apertura y cierre de la electroválvula. Además de la vibración, lo cual es normal debido al modo de funcionamiento de la electroválvula, se observan oscilaciones aleatorias, causando estímulos indeseados en el actuador.

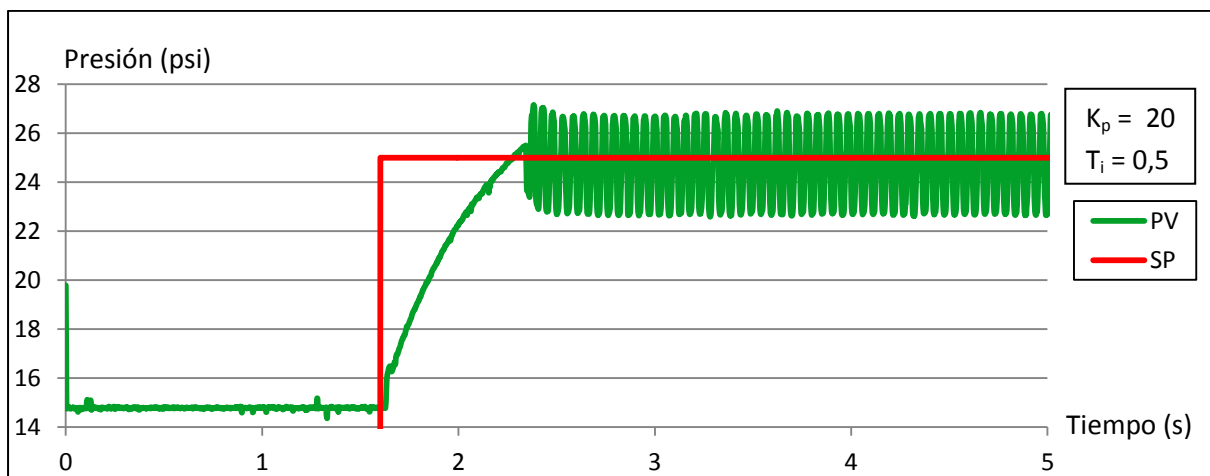
Con el fin de obtener un mejor funcionamiento en el actuador, se procede a realizar una sintonización de los parámetros del controlador de forma empírica. Fijando el SP a 25 psi, se

comienza aumentando  $K_p$ , con  $T_i$  y  $T_d$  a 0, hasta alcanzar oscilaciones constantes aunque estas no alcancen el SP. Esto se consigue fijando  $K_p = 20$  (ver figura 4.13.).



**Figura 4.13.** Oscilaciones constantes sin llegar al SP con  $K_p=20$ .

Se observan oscilaciones con una amplitud constante de 4 psi, que no llegan a alcanzar el SP establecido. Para eliminar este error en estado estacionario se aumenta  $T_i = 0,00001$ , aplicando de esta manera una acción integral al error generado entre SP y PV. Esto consigue eliminar el error en estado estacionario pero produce ciertas oscilaciones en el actuador. Introduciendo una acción proporcional con  $T_d$ , el resultado no mejora y el sistema se vuelve inestable. Aumentando  $T_i$  de nuevo, se consigue mejorar el comportamiento del actuador llegando a alcanzar su mejor funcionamiento con  $K_p = 20$  y  $T_i = 0,5$  (ver figura 4.14.).

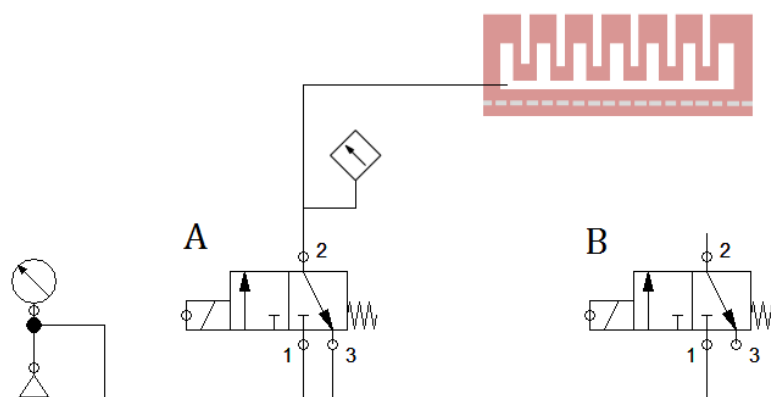


**Figura 4.14.** Introducción de parámetro integral. Oscilaciones constantes en torno a SP.

Para un controlador con PWM y una sola válvula se consigue el mejor funcionamiento con un control PI con parámetros  $K_p = 20$  y  $T_i = 0.5$  tal y como se ha podido comprobar. Se observan oscilaciones constantes de presión en el actuador que el controlador es incapaz de eliminar matemáticamente debido sencillamente al diseño del circuito neumático al emplear una electroválvula ON-OFF, la cual trabaja constantemente abriendo y cerrando el flujo de aire a presión, motivo de dichas oscilaciones.

#### 4.6.2. SISTEMA PID-PWM CON DOS ELECTROVÁLVULAS

Como alternativa al control con una sola electroválvula, se propone introducir una segunda válvula para regular la presión en el actuador. El motivo de una segunda electroválvula es intentar no sólo controlar la entrada de aire en el actuador, sino también la salida de él, de la cual anteriormente se encargaba la primera electroválvula. Para esta idea es necesario modificar el circuito neumático que controle el actuador (ver figura 4.15.).



**Figura 4.15.** Circuito neumático para el control de presión con dos electroválvulas.

En la imagen superior se puede ver la electroválvula B conectada a la salida de la electroválvula A con el objetivo de implementar el siguiente patrón de funcionamiento:

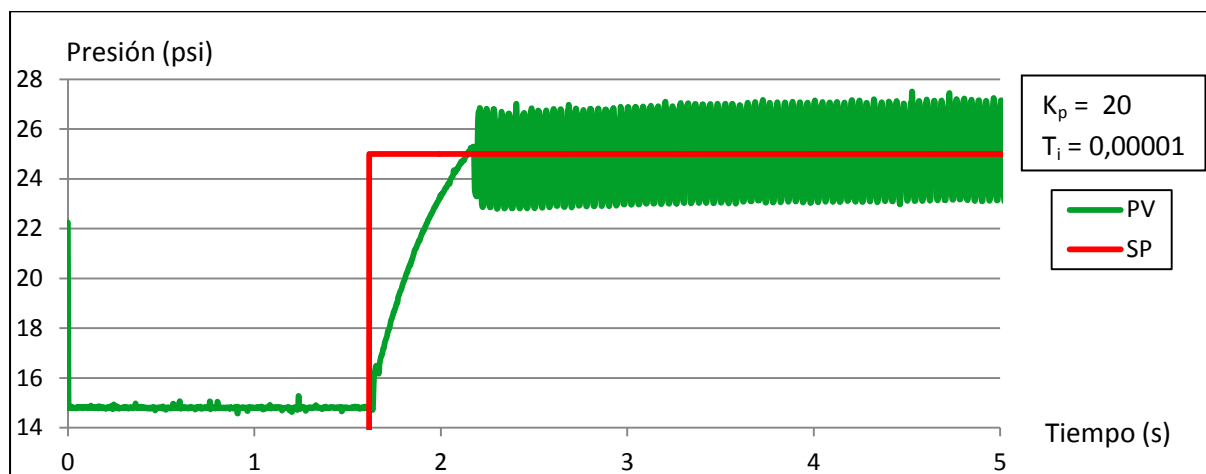
**Tabla 4.5.** Tabla de estados de las electroválvulas.

	Electroválvula A	Electroválvula B	Resultado
<b>Estado 1</b>	0	0	Presión no varía. No entra ni sale aire.
<b>Estado 2</b>	1	0	Presión aumenta. Entra aire
<b>Estado 3</b>	0	1	Presión disminuye. Sale aire.
<b>Estado 4</b>	1	1	<i>Estado no deseado</i>

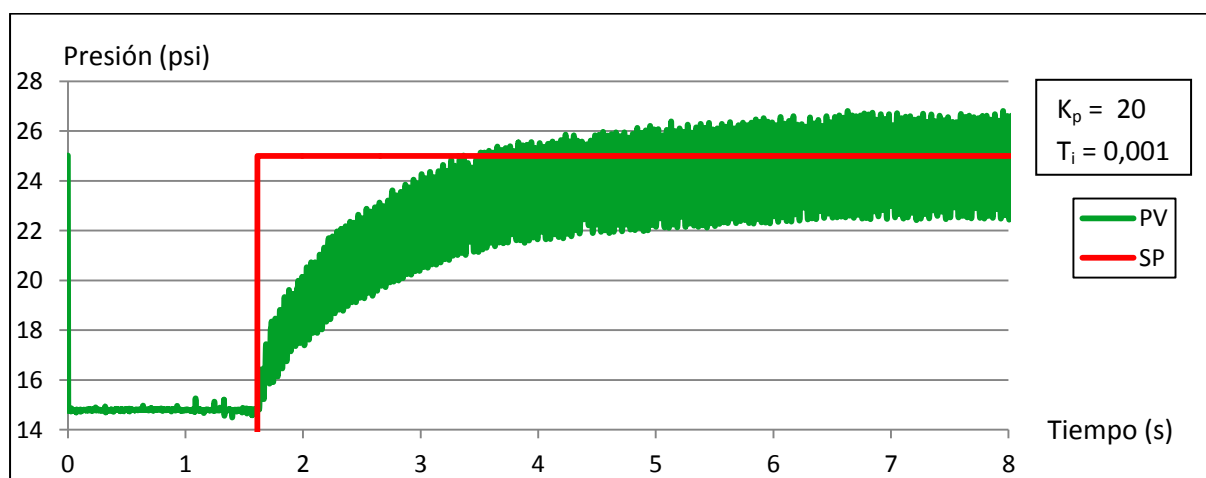
Con esta configuración, se pretende conseguir un estado en el que no exista ni entrada ni salida de aire en el actuador, de manera que tanto la presión como la masa de aire en él se mantengan constantes. En la configuración anterior esto no era posible, ya que, según el circuito neumático, el actuador siempre iba a estar sometido a 1 de 2 presiones posibles: o la presión de la fuente de aire, o la presión atmosférica, de manera que siempre existía un flujo de aire cuando se encontraba trabajando en torno a un SP o consigna.

Mediante la configuración de dos electroválvulas, cuando el actuador llegue al SP, el controlador deberá alcanzar el estado 1, manteniendo totalmente la presión en el actuador.

Al poner en práctica esta idea, se procedió a la calibración del controlador al igual que se hizo anteriormente, sintonizando las constantes  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , para optimizar y ajustar su funcionamiento. Como resultado, se establecieron unos parámetros de funcionamiento de manera que  $K_p = 20$  y  $T_i = 0,00001$ . Aumentando  $T_i$  se reduce la velocidad de respuesta del sistema pero también se consigue reducir las vibraciones y diversos comportamientos en el actuador como estímulos y vibraciones indeseadas (ver figuras 4.16 y 4.17).



**Figura 4.16.** Respuesta del actuador para un control con dos válvulas con  $K_p=20$  y  $T_i$  muy bajo.



**Figura 4.17.** Respuesta del actuador para un control con dos válvulas con  $K_p=20$  y aumentando  $T_i$ .

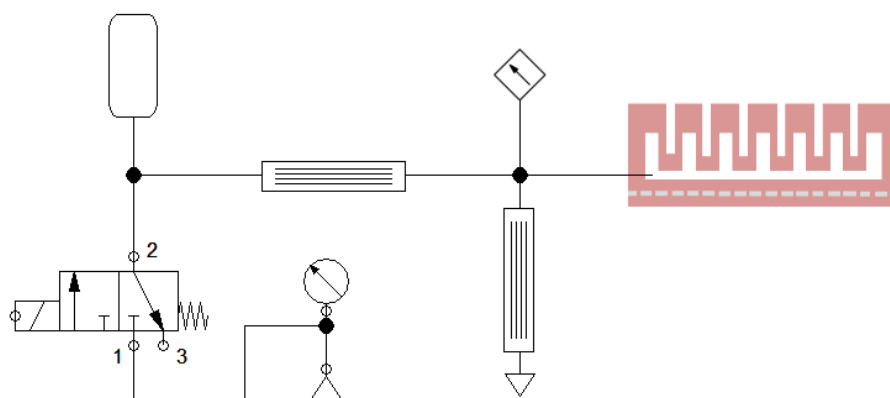
Al observar los resultados, estos no son los esperados. Las electroválvulas permanecen encendiéndose y apagándose constantemente al igual que el control con una sola válvula, por lo que ni el aire ni la presión permanecen constantes en el interior del actuador. Esto puede ocurrir por varias razones. Una es debido a posibles pérdidas en el circuito neumático, de manera que las válvulas han de estar constantemente permitiendo y bloqueando el flujo de aire.

Otra de los motivos importantes es el volumen tan reducido donde se ha de controlar la presión. En un volumen tan pequeño, un simple pulso de aire supone un pico de presión muy significativo en el actuador. Esto, sumado al constante abrir y cerrar de la válvula, supone grandes oscilaciones a alta frecuencia en torno al SP, de manera que el controlador no es capaz de registrar un PV lo suficientemente preciso como para bloquear las dos válvulas y mantener la presión.

#### 4.6.3. SISTEMA PID-PWM CON UNA ELECTROVÁLVULA + FILTRO

Dado que matemáticamente el controlador no es capaz de solucionar el problema de las constantes oscilaciones de presión en el actuador, se procede a desarrollar una configuración neumática modificando el circuito utilizado para el control de presión con una sola electroválvula.

Con ello se pretende suavizar la salida de aire en la electroválvula, reduciendo de esta forma el ruido registrado en los sensores de presión y facilitando de así la acción de control que utiliza estas mediciones. Para ello, se ha introducido en el circuito un Filtro Paso Bajo (FPB) neumático. Este consta de dos elementos principales: un depósito neumático y una resistencia neumática (ver figura 4.18).



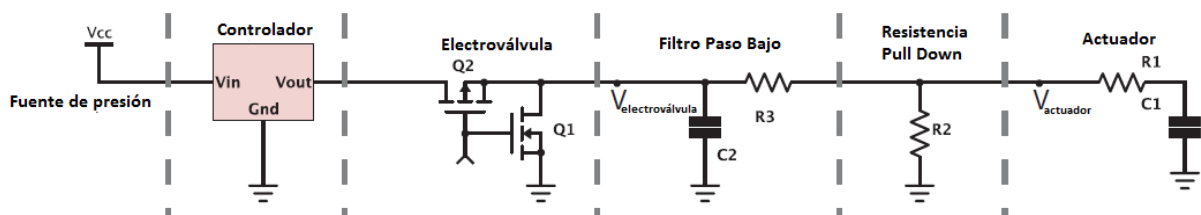
**Figura 4.18.** Circuito neumático para el control de presión con una electroválvula y filtro neumático.

Este FPB es una solución sencilla y de muy bajo coste, cuya función es la de suavizar la entrada de aire en el actuador, afinando de esta manera su respuesta. El depósito neumático que se ha utilizado es una jeringuilla de farmacia y la resistencia neumática se ha conseguido introduciendo algodón en el tubo [45] (ver figura 4.19).



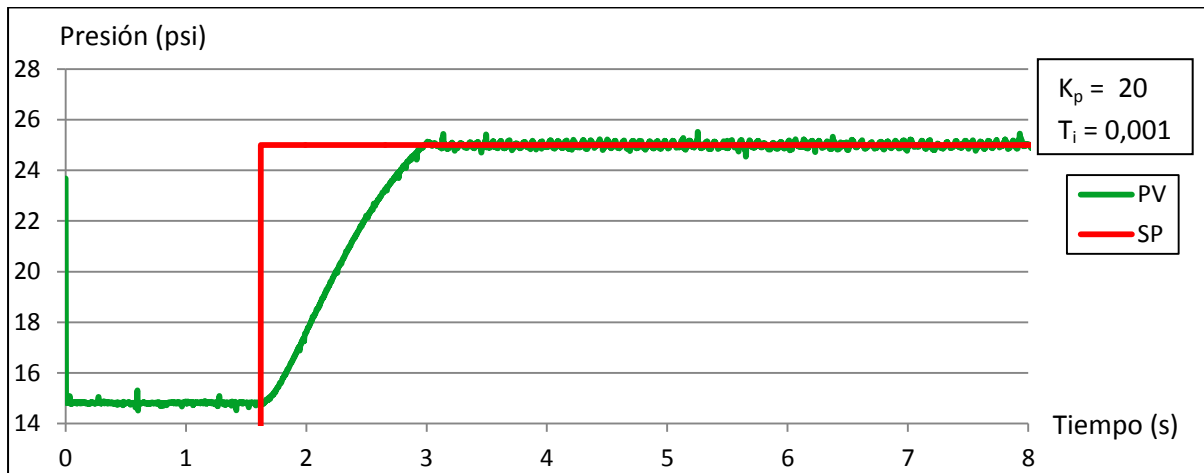
**Figura 4.19.** Tubo neumático con algodón en su interior conectado a una jeringuilla.

Este circuito neumático puede ser representado como su analogía eléctrica, donde la presión es análoga a la tensión, y el flujo de aire a la corriente eléctrica. De esta manera el FPB neumático corresponde a un FPB RC, donde el actuador es representado como una carga resistiva y capacitiva. Este FPB neumático atenúa las oscilaciones con las que el aire entra en el actuador neumático y la resistencia pull-down facilita la salida de aire del actuador [45] (ver figura 4.20).



**Figura 4.20.** Analogía eléctrica al filtro paso bajo neumático [45].

Con el montaje ya realizado, se procede a calibrar los parámetros del controlador para optimizar lo máximo posible el funcionamiento del actuador y poner a prueba la nueva configuración neumática. Se toman como constantes  $K_p = 20$  y  $T_i = 0,01$  y se somete al actuador a una entrada en forma de escalón de 25 psi (ver figura 4.21).

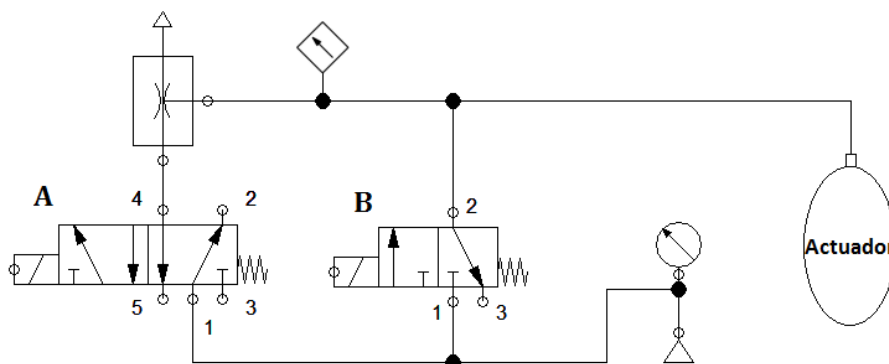


**Figura 4.21.** Respuesta del actuador con un control con una electroválvula y filtro neumático.

Se puede observar, que los resultados son totalmente favorables. Aunque la respuesta del actuador hasta que alcanza el SP se vuelve más lenta, ésta sigue siendo rápida debido al reducido volumen que el aire tiene que ocupar, tardando en torno a 1,4 s en alcanzar los 25 psi. La mejora más notable se observa en su estado estacionario, donde las constantes oscilaciones desaparecen, percibiéndose únicamente pequeñas oscilaciones con unas décimas de error en torno al SP. Esto se puede rectificar mejorando la instalación neumática y utilizando un depósito y unas resistencias neumáticas que proporcionen un mayor rendimiento.

#### 4.7. CONTROL DE PRESIÓN NEGATIVA

Para el control de vacío se ha utilizado una electroválvula 5/2 SMC de la serie SY5120 conectada a un eyector que se encarga de extraer el aire del actuador. Al mismo tiempo, el sensor de vacío mide la presión negativa que se genera en el interior del actuador (ver figura 4.22).



**Figura 4.22.** Circuito neumático para el control de vacío.



Para el vacío se ha desarrollado un programa sencillo de control. Este consiste únicamente en un control ON/OFF, desactivando o activando la electroválvula para extraer o no aire del actuador, sin mantener la presión en torno a ninguna consigna. Esto es debido a que al llegar a un punto, apenas queda aire en el interior del actuador y la electroválvula y el eyector no tienen la suficiente potencia como para seguir extrayéndolo y deduciendo la presión, por lo que la presión en él se acaba estabilizando. Esta presión no alcanza los -14,7 psi de presión manométrica (0 psi absolutos), sino que alcanza el estado estacionario en -10,6 psi de presión mano (ver figura 4.23).

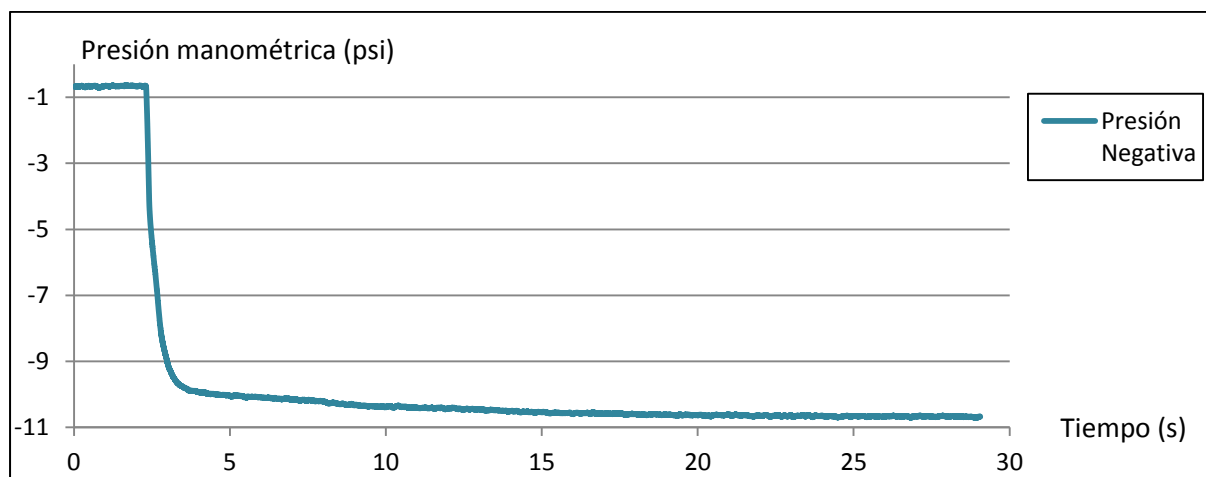


Figura 4.23. Respuesta del actuador ante la activación del vacío.

Al bloquear la electroválvula para detener el vacío en el actuador, éste tarda notablemente volver a recuperar la presión atmosférica en su interior. Por este motivo se ha introducido una segunda electroválvula (electroválvula B). Cuando la electroválvula A se desactiva, la electroválvula B se abre durante 8 s para introducir aire en el actuador con el objetivo de recuperar más rápidamente la presión atmosférica en él.

## 4.8. RESULTADOS

Se ha conseguido desarrollar un sistema efectivo para el control de la presión en el interior del actuador Pneunets. Esto ha sido posible realizando distintas pruebas modificando la instalación neumática y variando los parámetros en el controlador PID.

Uno de los principales retos ha sido el intentar eliminar las continuas oscilaciones en torno al punto de consigna de presión en el actuador. La electroválvula, al proporcionar una salida digital de aire, esta generaba un ruido constante en el actuador, lo que generaba notables vibraciones y un funcionamiento inestable en el actuador. Tras varios intentos de solucionar el problema modificando parámetros en el controlador, se llegó a la conclusión de que había que introducir algún tipo de solución para reducir la fuerza con la que el aire entraba en el actuador.

Finalmente introduciendo el filtro paso bajo neumático, se comprobó que los resultados fueron visiblemente satisfactorios, reduciendo esas anomalías prácticamente al completo y mejorando en gran medida la precisión del actuador.

En cuanto al control de vacío, una primera prueba se realizó utilizando también un controlador PID con PWM, pero se observó que el ruido generado con este sistema era incluso mayor que en el control de presión, debido a que la electroválvula para el control de vacío permitía un flujo de aire mucho mayor. Esta opción se descartó y se procedió a probar a crear vacío en un volumen cerrado abriendo la electroválvula por completo. Con ello se comprobó que pasado un tiempo, la presión se estabilizaba automáticamente en torno a un valor inferior a -1 atm. Con ello se decidió generar vacío de esta manera, únicamente abriendo o cerrando la electroválvula por completo.

En conclusión se han desarrollado un sistema de control de presión y un sistema de control de vacío bastante efectivos y flexibles, que permiten someter a estudio diversos robots y actuadores blandos con el objetivo de evaluar su funcionamiento.

## 5. CASOS DE ESTUDIOS

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez desarrolladas las estrategias de control para presión positiva y presión negativa, y comprobado su correcto funcionamiento, se procede a aplicarlas sobre varios actuadores blandos con el objetivo de examinar su comportamiento.

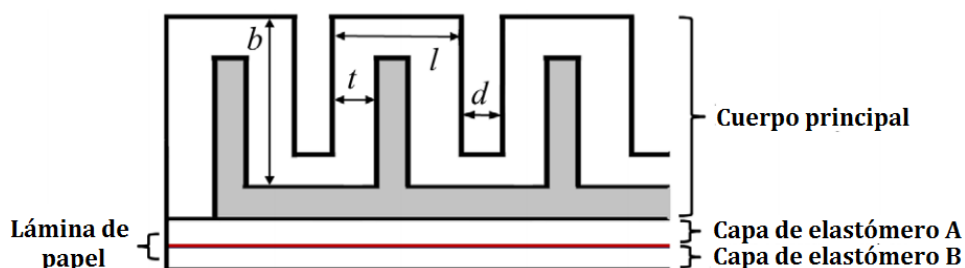
Los actuadores que han sido evaluados son el actuador Pneuets, una pinza de tres dedos, y el actuador Jamming.

### 5.2. ACTUADOR PNEUNETS

Este actuador, descrito en el apartado 2.3.1.2 (Actuadores neumáticos blandos (SPAs)), ha sido sobre el que se han realizado todas las pruebas de control de presión positiva, desarrollándose numerosos ensayos para llegar a la solución final del control de presión.

El actuador está compuesto por una serie de cavidades en línea unidas por un único canal, de manera que al introducir aire en el interior, las cavidades se hinchan, y el actuador se dobla sobre sí mismo. El movimiento de este actuador, así como la fuerza y presión que admita pueden variar, dependiendo principalmente de su geometría y los materiales utilizados.

En cuanto a la geometría, se pueden variar distintas dimensiones del actuador afectando así al funcionamiento del mismo. Estos parámetros de diseño van desde la altura, anchura o profundidad de las cámaras, hasta su volumen o el grosor de sus paredes, así como el número de cámaras que formarán el actuador [50] (ver figura 5.1).



**Figura 5.1.** Geometría y estructura del actuador Pneuets visto desde su sección longitudinal [51].

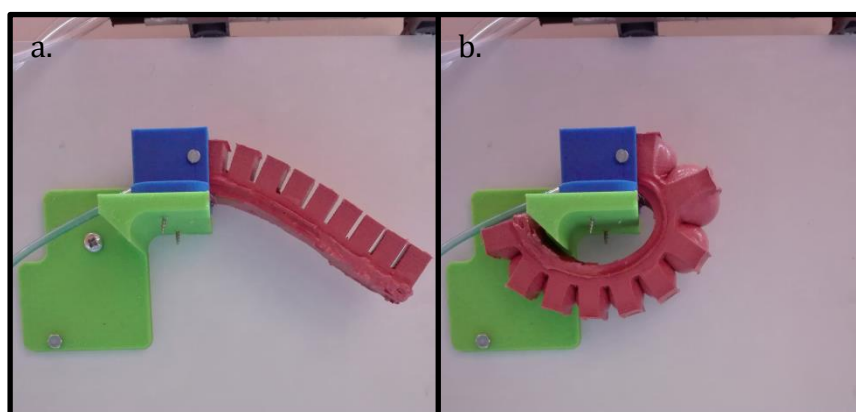
El material utilizado en la fabricación del actuador también es de gran importancia, afectando considerablemente a su funcionamiento. Este material suele ser normalmente un

elastómero fácil de moldear en estado líquido para posteriormente adquirir su forma definitiva en estado sólido.

Elastómeros que pueden ser utilizados en la fabricación de este actuador son el Elastosil M4601 (módulo de Young  $\approx 7$  MPa y dureza Shore A 28) o el Ecoflex 0030 (módulo de Young  $\approx 0,1$  MPa, dureza Shore A 00-30).

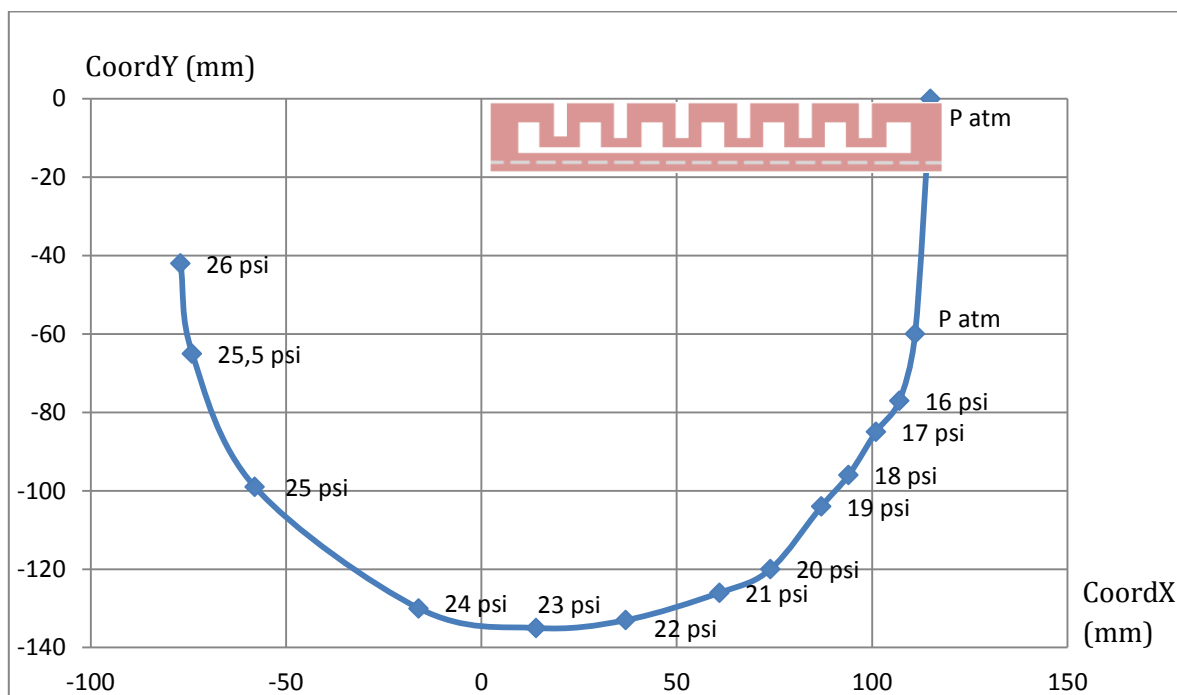
Para este proyecto en concreto, el actuador Pneunets que ha sido sometido a ensayos ha sido fabricado con Elastosil M4601 y una lámina de papel como material inextensible. Como rasgos principales de su geometría, el actuador presenta 10 cámaras, cada una de ellas con una altura de 15 mm, 11 mm de anchura y 8 mm de profundidad. A su vez en el interior de cada cámara se encuentra una cavidad de 13x9x6 mm, lo que significa que las paredes de las cámaras poseen un grosor de 1mm.

Estas características de geometría y composición de sus materiales hacen que el actuador admita presiones de hasta 26 psi (177 kPa) de presión absoluta, presión que supera la necesaria para doblarse por completo. Esta presión marca el límite del actuador, momento en el cual existe riesgo de rotura (ver figura 5.2).



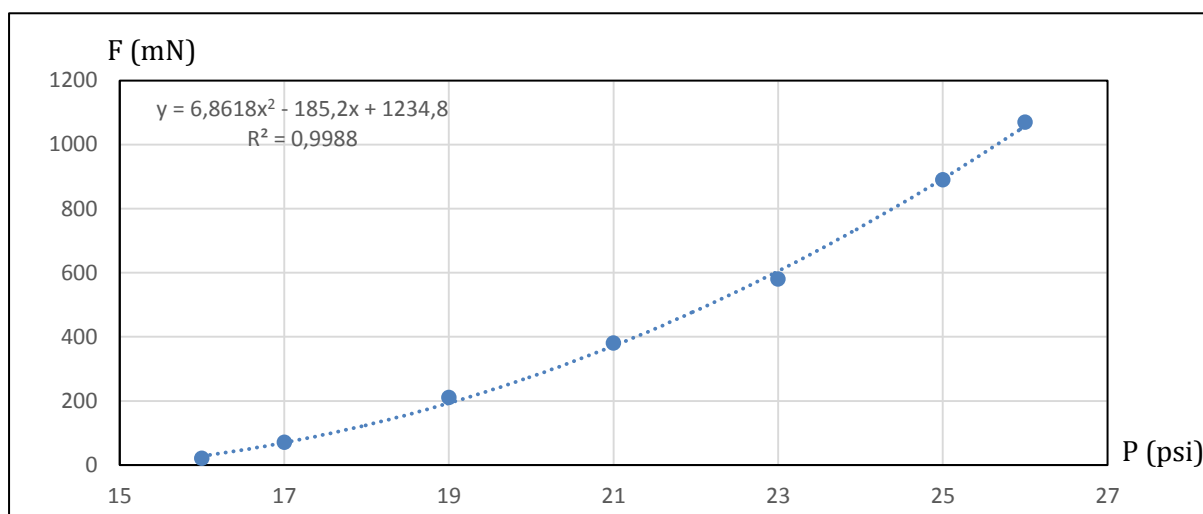
**Figura 5.2.** (a) Actuador Pneunets en reposo. (b) Actuador Pneunets a 26 psi.

Con la adquisición de datos detallada en el apartado 4.3.2. (Deformación) es posible recopilar información necesaria para relacionar la presión a la que es sometido el actuador con la deformación que presenta sobre sí mismo. Los datos obtenidos con las coordenadas en las que se encuentra el actuador y la presión en su interior en cada instante dieron como resultado la gráfica que se muestra a continuación:



**Figura 5.3.** Gráfica de deformación del actuador Pneunets en función de su presión.

De la misma forma que es posible medir la deformación en el actuador para diferentes presiones, también se llevó a cabo un ensayo para medir la fuerza que ejerce el actuador en su extremo en función de la presión en su interior. Con un sensor de fuerza trabajando en una aplicación externa al programa de control, se realizaron distintas mediciones con la finalidad de poder establecer una relación entre esta magnitud y la presión en el interior del actuador. Los resultados fueron los siguientes:



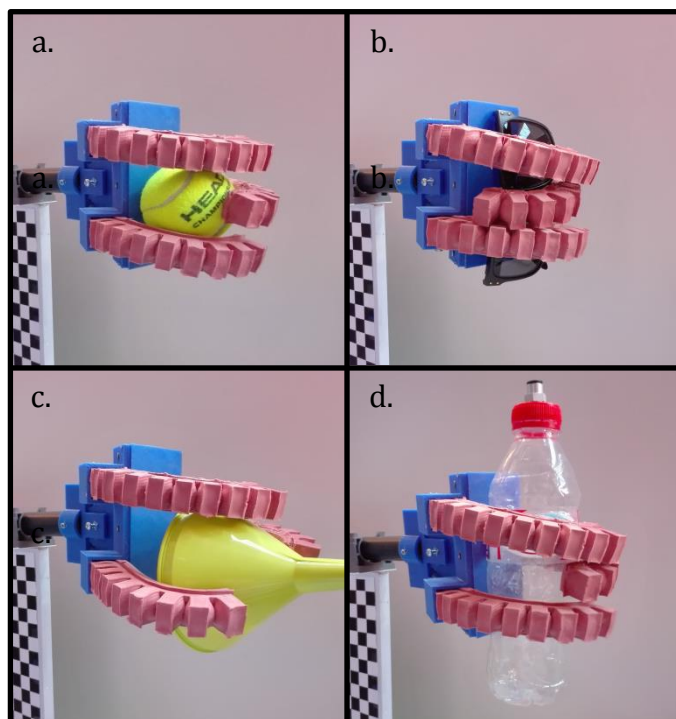
**Figura 5.4.** Fuerza que desarrolla el extremo del actuador en función de la presión en su interior.

Modificaciones en la geometría del actuador, así como la ampliación del grosor de las paredes o el uso de materiales distintos hacen que el actuador tolere presiones superiores. De esta manera, para los ensayos de deformación y fuerza se pueden conseguir resultados distintos, consiguiendo así deformaciones y fuerzas mayores.

### 5.3. PINZA DE TRES DEDOS

Esta pinza de tres dedos está formada por 3 actuadores Pneunets trabajando independientemente uno de otro. Debido a que cada actuador Pneunets posee imperfecciones surgidas durante su fabricación como pueden ser pequeñas burbujas de aire, el funcionamiento de cada uno de ellos será diferente.

Otro de los motivos de implementar un control individual para cada uno de los dedos de la pinza es que las geometrías de los actuadores Pneunets que lo componen son distintas. Al evaluar el actuador Pneunets, se llegó a la conclusión de que 1 mm para la pared de las cámaras podía ser lo suficientemente estrecho como para provocar una rotura con facilidad. Por este motivo se diseñaron actuadores con paredes de 2 mm de grosor. Esto dio lugar a varias generaciones de actuadores Pneunets, de manera que la pinza de tres dedos está constituida por un actuador con paredes de 1 mm de espesor, y otros dos actuadores con paredes de 2 mm. Esto hace totalmente necesario un control individualizado de los dedos para evitar roturas y para garantizar un correcto funcionamiento de la pinza (ver figura 5.5).



**Figura 5.5.** Actuador sujetando diferentes objetos. (a) Pelota de pádel. (b) Gafas de sol. (c) Embudo. (d) Botella de agua.

## 5.4. ACTUADOR JAMMING

El actuador Jamming es un actuador cuyo principio de funcionamiento se basa en el vacío. Este actuador está formado por un globo relleno de café molido. Al apretar el globo contra un objeto y activar el vacío, el café se compacta envolviendo al objeto y sujetándolo.

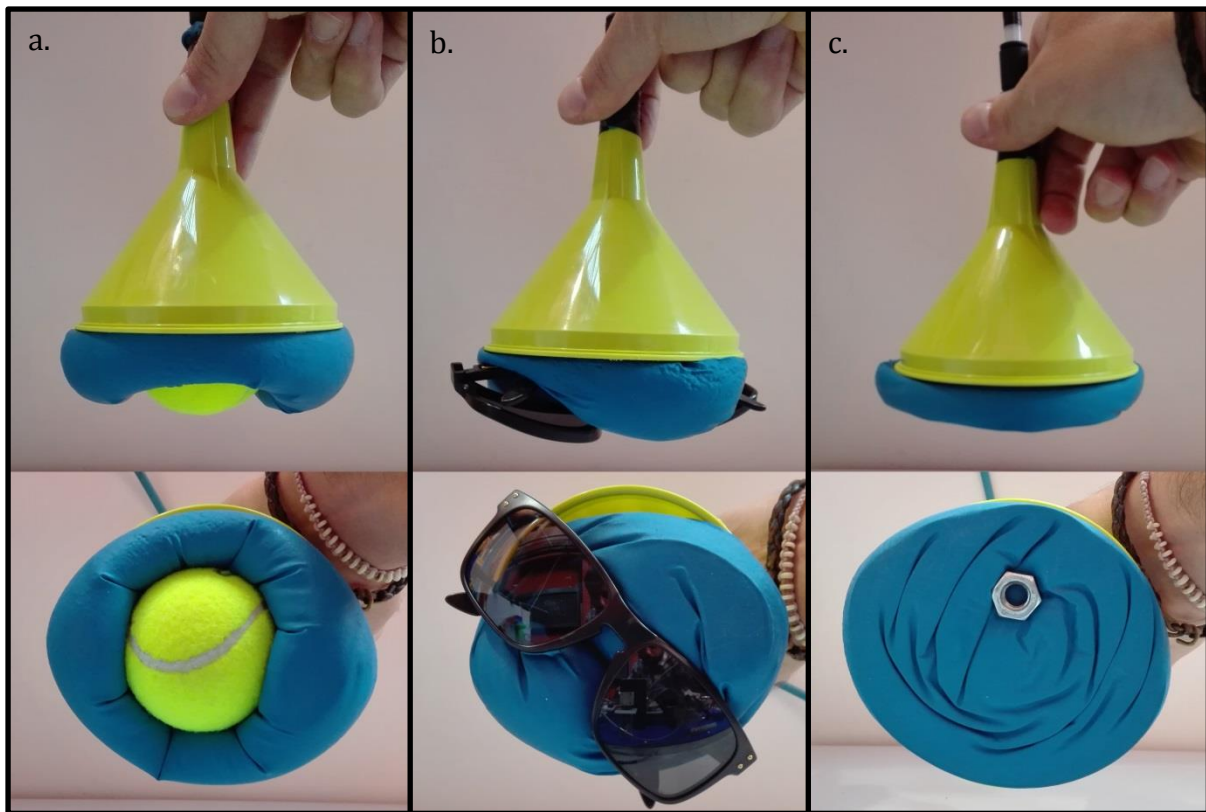
El globo está unido a un embudo de plástico como estructura de sujeción. El cuello del globo atraviesa la tobera del embudo, de donde sale un tubo que va conectado al eyector, que se encarga de extraer el aire del globo, creando el vacío. El tubo que va insertado en el cuello del globo y en la tobera del embudo, presenta un pequeño trozo de tela a modo de filtro, con el objetivo de impedir que el eyector absorba el café (ver figura 5.6).



**Figura 5.6.** Estructura del actuador Jamming.

Este actuador presenta dos grandes ventajas. Una de ellas es su capacidad para agarrar objetos, adaptándose a su geometría y evitando dañarlos, lo que hace posible agarrar objetos de gran fragilidad. La otra ventaja es la gran variedad de objetos y formas que el actuador puede agarrar, desde objetos grandes con un tamaño que el globo pueda envolver, hasta objetos pequeños como un simple tornillo o una simple tuerca (ver figura 5.7).





**Figura 5.7.** Actuador Jamming sujetando diferentes objetos. (a) Pelota de pádel. (b) Gafas de sol. (c) Tuerca.

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras las diferentes pruebas y ensayos realizados fue posible llegar a diferentes resultados que dan lugar a conclusiones y posibles trabajos futuros y puntos de mejora para el funcionamiento de los actuadores blandos y sobre todo para el banco de ensayos, que es el punto principal de análisis de este proyecto.

Una de las tareas que más tiempo requirió fue la de alcanzar una estrategia de control efectiva con los dispositivos y componentes que constituyen el banco de ensayos. El hándicap principal era el funcionamiento de las electroválvulas, las cuales, al tratarse de válvulas ON/OFF, generaban enormes vibraciones y oscilaciones en el actuador debido a estar constantemente abriendo y cerrando el flujo de aire. Esto podría solucionarse o al menos probar a realizar ensayos con electroválvulas de salida proporcional, las cuales regulan el flujo de aire que le llega al actuador en función de la señal analógica que les llega del controlador. No obstante, los resultados obtenidos al enfrentarse a este problema fueron bastante satisfactorios al encontrar la solución de introducir un filtro paso bajo neumático en el control de presión.

El diseño del banco como idea de una plataforma modular fue una elección acertada, lo que permite cambiar, mover componentes de un sitio a otro del banco o introducir nuevos componentes de una forma rápida y sencilla. En este aspecto y tras la experiencia adquirida durante el proyecto, es necesario realizar un estudio exhaustivo previo sobre la aplicación o aplicaciones que el banco controlará, con el objetivo de optimizar el espacio en el banco e incluir los componentes necesarios que le aporten la eficacia y potencia que necesita.

En cuanto a los actuadores sometidos a ensayos, más concretamente al actuador Pneunets, éste requiere una fabricación cuidadosa. Durante este proyecto no se ha llevado ningún proceso de fabricación de estos actuadores, pero este proceso de fabricación tiene algunas etapas delicadas como son la introducción del actuador en una cámara de vacío durante su fase líquida para eliminar burbujas de aire o el posterior horneado del actuador. Estas etapas dan lugar a imperfecciones en su estructura como son burbujas de aire sin eliminar, lo que da lugar a anomalías en el funcionamiento del actuador y en varias ocasiones conllevó a su rotura.

Un punto de mejora y ampliación del banco de ensayos tiene que ver con el programa de control desarrollado. El programa, como se puede observar en el Anexo III.A (Pantalla de inicio), posee un botón "VISIÓN" que se encuentra deshabilitado. Esta opción pretende incluir un sistema de visión, con el objetivo de recopilar información y obtener conclusiones sobre los movimientos del actuador al variar parámetros como pueden ser la presión, su geometría, o los materiales que lo componen.

Otros trabajos futuros como puntos de mejora en el banco de ensayos pueden ser el desarrollar un sensor blando EGaIn para incorporarlo al banco con el objetivo de medir la deformación en los actuadores a evaluar, e incluir un sistema que permita medir la variación de volumen en el actuador como puede ser un sensor de flujo, lo que daría una importante información y gran valor práctico a los modelos físicos que describen a estos actuadores.

## REFERENCIAS

- [1] V. r. González, «Galería de recursos didácticos y cursos en línea,» 2000, [En línea]. Available: [http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr\\_0708/archivos/\\_15/Tema\\_5.2.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.2.htm). [Último acceso: 15 Julio 2015].
- [2] «Robots Aspiradores,» 18 Junio 2015. [En línea]. [Último acceso: Julio 2015].
- [3] «Brickipedia,» 2013. [En línea]. Available: <http://lego.wikia.com/wiki/Mindstorms>. [Último acceso: Julio 2015].
- [4] F. Alonso-Martín, J. F. Gorostiza, M. Malfaz y M. A. Salichs, «User Localization During Human-Robot Interaction,» 23 Julio 2012.
- [5] A. Franco, «LA COMUNIDAD DE LOS ROBOTS,» 22 Junio 2013. [En línea]. Available: <http://lacomuniddelosrobots.blogspot.com.es/>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [6] K. Cho, «Soft Robotics for Natural and Adaptive Motion Generation,» de *IEEE 13th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, Herl'any, Slovakia, 2015.
- [7] C. Heyer, «Human-Robot Interaction and Future Industrial Robotics Applications,» de *The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, 2010.
- [8] J. Medina Hernández y P. Vélez Núñez, «Soft Robotic: A change of conventional paradigm of robotics,» 2015.
- [9] S. G. Nurzaman, F. Iida, C. Laschi, A. Ishiguro y R. Wood, «Soft Robotics,» *IEEE ROBOTICS & AUTOMATION MAGAZINE*, pp. 24-95, 2013.
- [10] F. P. Chávez, «Bioblogía,» 2012.
- [11] A. Albu-Schäffer, O. Eiberger, M. Grebenstein, S. Haddadin, C. Ott, T. Wimböck, S. Wolf y G. Hirzinger, «Soft Robotics. From Torque Feedback-Controlled Lightweight Robots to Intrinsically Compliant Systems,» *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 20-30, 2008.
- [12] M. Rahman, «A Novel Variable Impedance Compact Compliant Series Elastic Actuator for Human-Friendly Soft Robotics Applications,» de *2012 IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Paris, Francia, 2012.
- [13] P. Reuell, «Harvard Gazette,» 2011.

- [14] P. Polygerinos, Z. Wang, J. T. B. Overvelde, K. C. Galloway, R. J. Wood, K. Bertoldi y C. J. Walsh, «Modeling of Soft Fiber-Reinforced Bending Actuators,» *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, vol. 31, nº 3, pp. 778-789, Junio 2015.
- [15] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier y I. D. Walker, «Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research,» *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 5, nº 3, pp. 99-117, Septiembre 2008.
- [16] T. Li, K. Nakajima, M. Kuba, T. Gutnick, B. Hochner y R. Pfeifer, «FROM THE OCTOPUS TO SOFT ROBOTS CONTROL: AN OCTOPUS INSPIRED BEHAVIOR CONTROL ARCHITECTURE FOR SOFT ROBOTS,» *Vie et Milieu - Life and Environment*, vol. 61, nº 4, pp. 211-217, 2011.
- [17] «Cadenas Part Solutions,» [En línea]. Available: <http://partsolutions.com/festo-use-biomimicry-to-create-fish-tail-and-robotic-elephant-trunk/>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [18] «Whitesides Research Group - Soft Robotics,» [En línea]. Available: <http://gmwgroup.harvard.edu/research/index.php?page=23>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [19] «Singularity - Robotic Octopus Arm: the First Step on the Way to Soft-Robot Revolution,» [En línea]. Available: <https://www.singularityweblog.com/robotic-octopus-arm-the-first-step-on-the-way-to-soft-robot-revolution/>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [20] K. Harmon, «Scientific American - Will the Robot Uprising Be Squishy?,» [En línea]. Available: <http://blogs.scientificamerican.com/octopus-chronicles/will-the-robot-uprising-be-squishy/>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [21] «Images Scientific Instruments - Making an Air Muscle,» [En línea]. Available: <http://www.imagesco.com/articles/airmuscle/AirMuscleDescription03.html>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [22] A. Saenz, «SingularityHUB,» 2010.
- [23] G. M. Whitesides, «The Royal Society Publishing,» 2015.
- [24] «Octopus Project,» [En línea]. Available: <http://www.octopus-project.eu/results.html>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [25] F. Daerden y D. Lefeber, «Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation,» Bruselas.
- [26] «Soft Robotics Toolkit,» [En línea]. Available: <http://www.softroboticstoolkit.com/>. [Último acceso: Agosto 2015].

- [27] J. Barbuzano, «Materia - La robótica se ablanda,» 9 Agosto 2014. [En línea]. Available: <http://esmateria.com/2014/08/09/robots-pulpo-una-nueva-generacion-de-robots-blandos-esta-en-camino/>.
- [28] «COBHAM - tEODor Explosive Ordnance (EOD) Robot,» [En línea]. Available: [http://www.cobham.com/about-cobham/mission-systems/unmanned-systems/products-and-services/remote-controlled-robotic-solutions/teodor-explosive-ordnance-\(eod\)-robot.aspx](http://www.cobham.com/about-cobham/mission-systems/unmanned-systems/products-and-services/remote-controlled-robotic-solutions/teodor-explosive-ordnance-(eod)-robot.aspx). [Último acceso: Agosto 2015].
- [29] C. Franzen, «THE VERGE - The US military is spending \$2.9 million to develop a soft robot suit for soldiers,» 11 Septiembre 2014. [En línea]. [Último acceso: Agosto 2015].
- [30] J. C. Zagal, «Explora - Creando robots, imitando la fisonomía humana,» Mayo 2015. [En línea]. Available: <http://www.explora.cl/descubre/articulos-de-ciencia/tecnologia-articulos/ingenieria-articulos/4829-creando-robots-imitando-la-fisionomia-humana>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [31] R. Mutlu, G. Alici y W. Li, «Electroactive Polymers as Soft Robotic Actuators: Electromechanical Modeling and Identification,» de *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Wollongong, Australia, 2013.
- [32] G. Kovacs, S. Michel, . C. Dürager, U. Hintermüller y . A. Schmidlin, «Electroactive Polymer (EAP) Actuators».
- [33] T. Deyle, «Hizook - Electroactive Polymers (EAP) as Artificial Muscles (EPAM) for Robot Applications,» 28 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.hizook.com/blog/2009/12/28/electroactive-polymers-eap-artificial-muscles-epam-robot-applications>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [34] E. W. Hurd, J. A. Flint y I. H. Daniel, «Shape-memory Alloys in Reconfigurable Antennas,» de *2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, Reino Unido, 2014.
- [35] A. Wadood y Y. Yamabe-Mitarai, «TiAu and TiPt High Temperature Shape Memory Alloys,» de *11th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST)*, Islamabad, Pakistan, 2014.
- [36] C. Suh, J. Condal Margarit, Y. Seong Song y J. Paik, «Soft Pneumatic Actuator Skin with Embedded Sensors,» de *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, Chicago, Estados Unidos, 2014.
- [37] Y. Sun, Y. Seong Song y J. Paik, «Characterization of Silicone Rubber Based Soft Pneumatic Actuators,» de *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokio, Japón, 2013.

- [38] J. M. Florez, B. Shih, Y. Bai y J. K. Paik, «Soft Pneumatic Actuators for Legged Locomotion,» de *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bali, Indonesia, 2014.
- [39] F. Daerden, D. Lefeber, B. Verrelst y R. Van Ham, «Pleated Pneumatic Artificial Muscles: Compliant Robotic Actuators,» de *2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, Hawái, Estados Unidos, 2001.
- [40] L. Jentoft, Y. Tenzer, D. Vogt, I. Galiana y I. Daniher, «Takktile. Feel the Difference,» [En línea]. Available: <http://www.takktile.com/>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [41] «National Instruments - myRIO,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/myrio/esa/>. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [42] «National Instruments - LabVIEW,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/labview/esa/>. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [43] «OpenStax,» [En línea]. Available: [http://cnx.org/contents/484d4446-da50-4af4-bc44-d6a2e0d660df@14.1:3/An\\_Interactive\\_Approach\\_to\\_Sig](http://cnx.org/contents/484d4446-da50-4af4-bc44-d6a2e0d660df@14.1:3/An_Interactive_Approach_to_Sig). [Último acceso: Septiembre 2015].
- [44] Honeywell, *ASDX Series Silicon Pressure Sensors Datasheet*.
- [45] M. Memarian, *Novel Finger-like Soft Pneumatic Actuators for Affective Movement*, Waterloo, Ontario: Universidad de Waterloo, 2015.
- [46] «Control Tutorials for Matlab & Simulink. Introduction: PID Controller Design,» [En línea]. Available: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=ControlPID>. [Último acceso: 2015].
- [47] «National Instruments - What is a Pulse Width Modulation (PWM) Signal and What is it Used For?,» [En línea]. Available: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/294E67623752656686256DB800508989>.
- [48] H.-P. Halvorsen, «Tuning of PID controllers,» [En línea]. Available: [http://home.hit.no/~hansha/documents/control/theory/tuning\\_pid\\_controller.pdf](http://home.hit.no/~hansha/documents/control/theory/tuning_pid_controller.pdf). [Último acceso: Agosto 2015].
- [49] J. Bennett, A. Bhasin, J. Grant y W. C. Lim, «PIDTuningClassical,» 19 Octubre 2006. [En línea]. Available: <https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php?title=PIDTuningClassical&redirect=no>. [Último acceso: Julio 2015].
- [50] E. Gómez Suárez, *Trabajo Fin de Grado. DISEÑO, MODELADO Y FABRICACIÓN DE ROBOTS BLANDOS*, Leganés, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2015.



- [51] P. Polygerinos, S. Lyne, Z. Wang, L. F. Nicolini, B. Mosadegh, G. M. Whitesides y C. J. Walsh, «Towards a Soft Pneumatic Glove for Hand Rehabilitation,» de *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokio, Japón, 2013.



## ANEXO

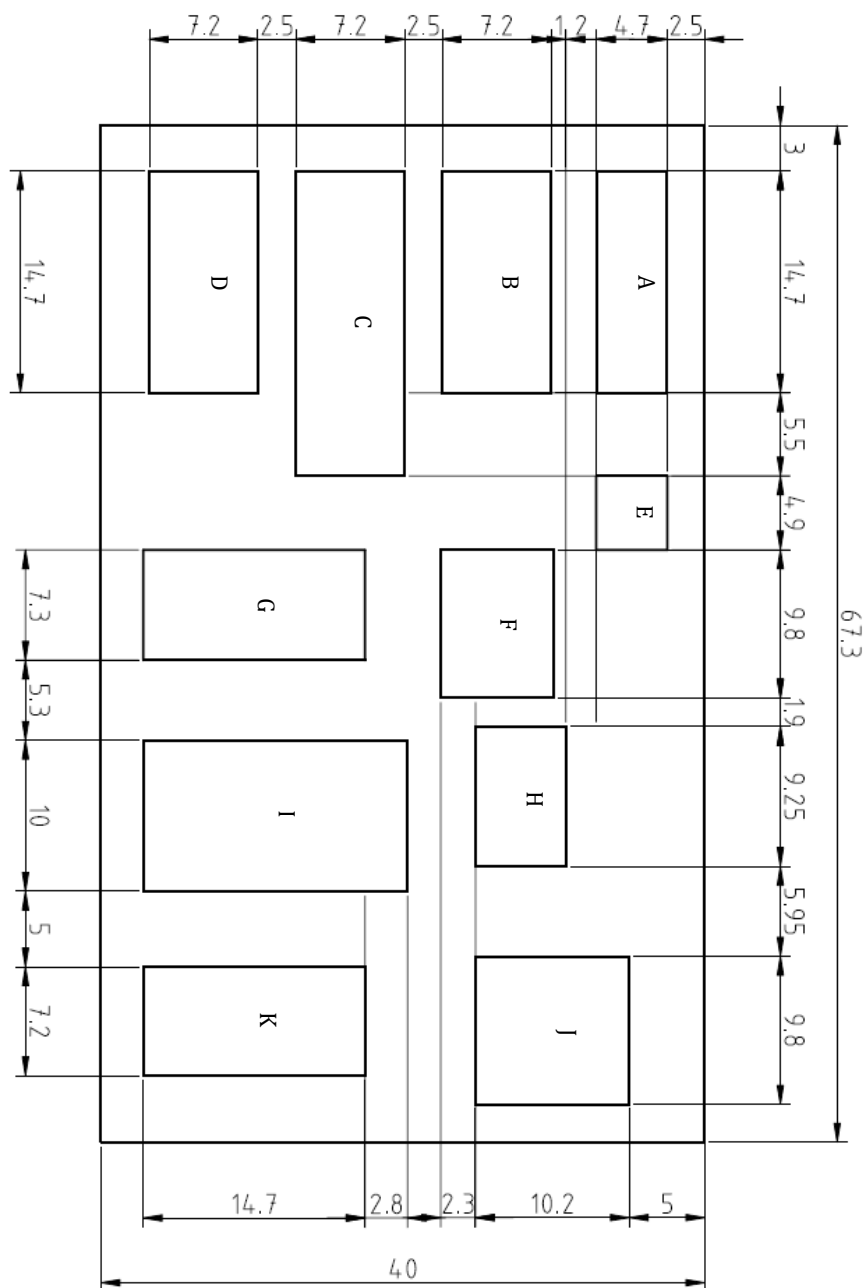
### I. PRESUPUESTO DETALLADO

Artículo	Cantidad	Precio €	Total	Precio Grupo
Neumática	Racor pasamuros ø4mm	5	4,84	24,20
	Racor "T" ø4mm	6	3,63	21,78
	Racor automáticos M5 ø4mm	8	1,815	14,52
	*Racor hembra ø6mm	3	3,025	
	Tubo neumático ø4mm	5	1,331	6,66
	Tubo neumático ø6mm	3	1,573	4,72
	Tubo neumático ø8mm	25	1,815	45,38
	Tubo neumático ø10mm	1	2,178	2,18
Dispositivos	Sensor presión	5	44,71	223,55
	*Electroválvula SY114	8	35,00	
	*Electroválvula SY5120	4	45,00	
	Potenciómetro 10kΩ	5	1,32	6,60
	Switch	5	0,70	3,50
	*Sensor vacío	1	250,00	
	*Eyector	2	30,00	
	myRIO	1	500,00	500,00
	*Manómetro	1	32,00	
Electrónica	Placa protoboard	2	4,00	8,00
	*Placa protoboard	2	4,00	
	Cable eléctrico	20	2,1074	42,15
	Conector caja 1X1 contactos	30	0,0275	0,83
	Conector terminal hembra	30	0,124	3,72
	Optoacopladores 4N35M	5	0,41	2,05
	MOSFET IRF540	5	0,87	4,35
	Resistencia 470Ω	5	0,21	1,05
	Resistencia 10kΩ	10	0,21	2,10
	Resistencia 100Ω	5	0,25	1,25
	*Fuente alimentación 24V	1		
Materiales	*Metacrilato	1		
	6 Tornillos métrica 5x60	8	1,59	12,72
	70 Tuercas hexagonal D.5	1	1,65	1,65
	Perfiles aluminio 1m	2	7,80	15,60
	*Escuadras perfiles aluminio	4		
Licencia LabVIEW		1	300,00	300,00
			300,00	300,00 €

TOTAL	1.248,54 €
-------	------------

\*Estos artículos no aplican en el precio final al ser artículos reutilizados, por lo que el precio unitario que aparece de ellos es un precio estimado.

## II. PLANO DEL BANCO DE ENSAYOS.



- A. Racores pasamuros
- B. Sensores de presión
- C. Electroválvulas SY114
- D. Switches y potenciómetros
- E. Sensor de vacío
- F. Eyectores
- G. Circuito de activación de las electroválvulas
- H. Electroválvulas SY5120
- I. myRIO
- J. Manómetro
- K. Placa de conexiones

	<b>Fecha:</b>	<b>Nombre:</b>	Universidad Carlos III de Madrid
	07/07/2015	Adrián Blanco Barragán	
<b>Escala:</b>	<i>Dimensiones del banco de control</i>		<b>Lámina nº:</b>
1:5			01
<b>Unidades:</b>			
[Cm]			

### III. INTERFAZ DEL PROGRAMA

#### III.A. PANTALLA DE INICIO

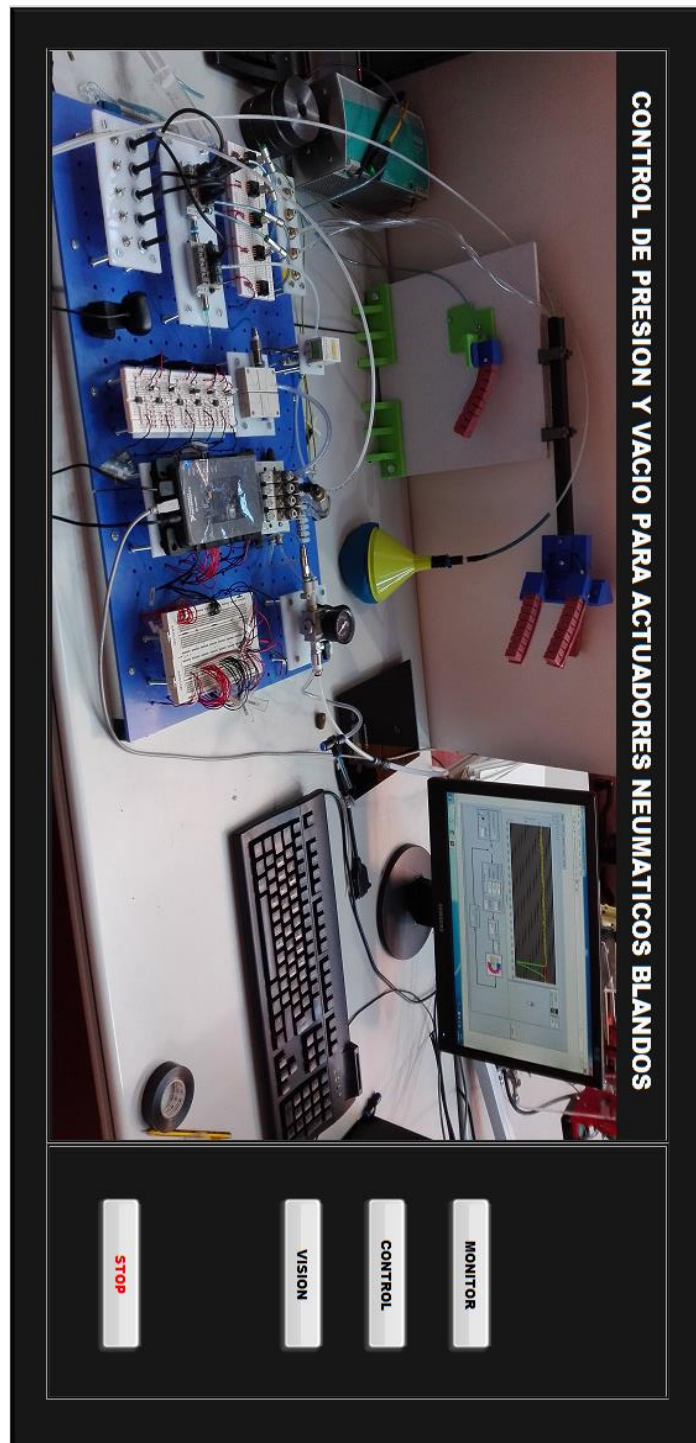


Figura III.A. Pantalla de Inicio.

### III.B. PANTALLA MONITOR

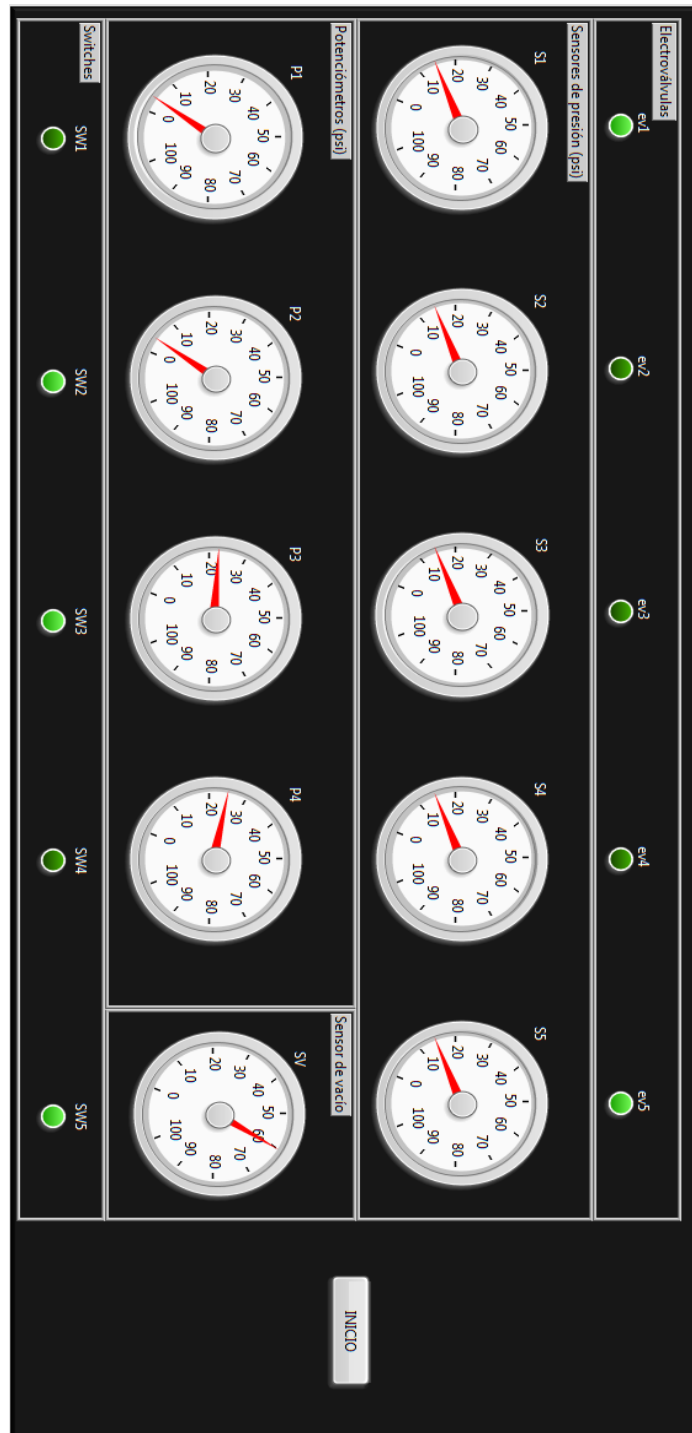


Figura III.B. Pantalla Monitor.

### III.C. PANTALLA DE CONTROL DE PRESIÓN

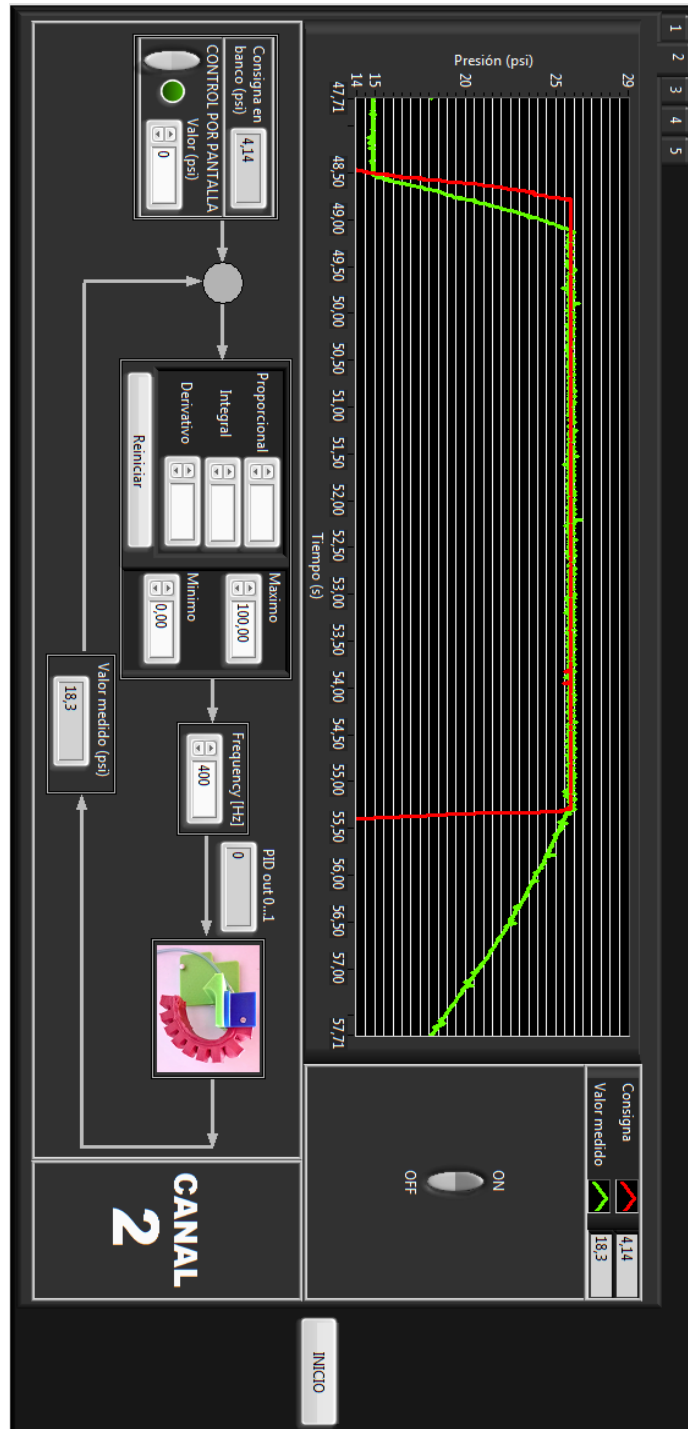


Figura III.C. Pantalla de Control de presión.

### III.D. PANTALLA DE CONTROL DE VACÍO

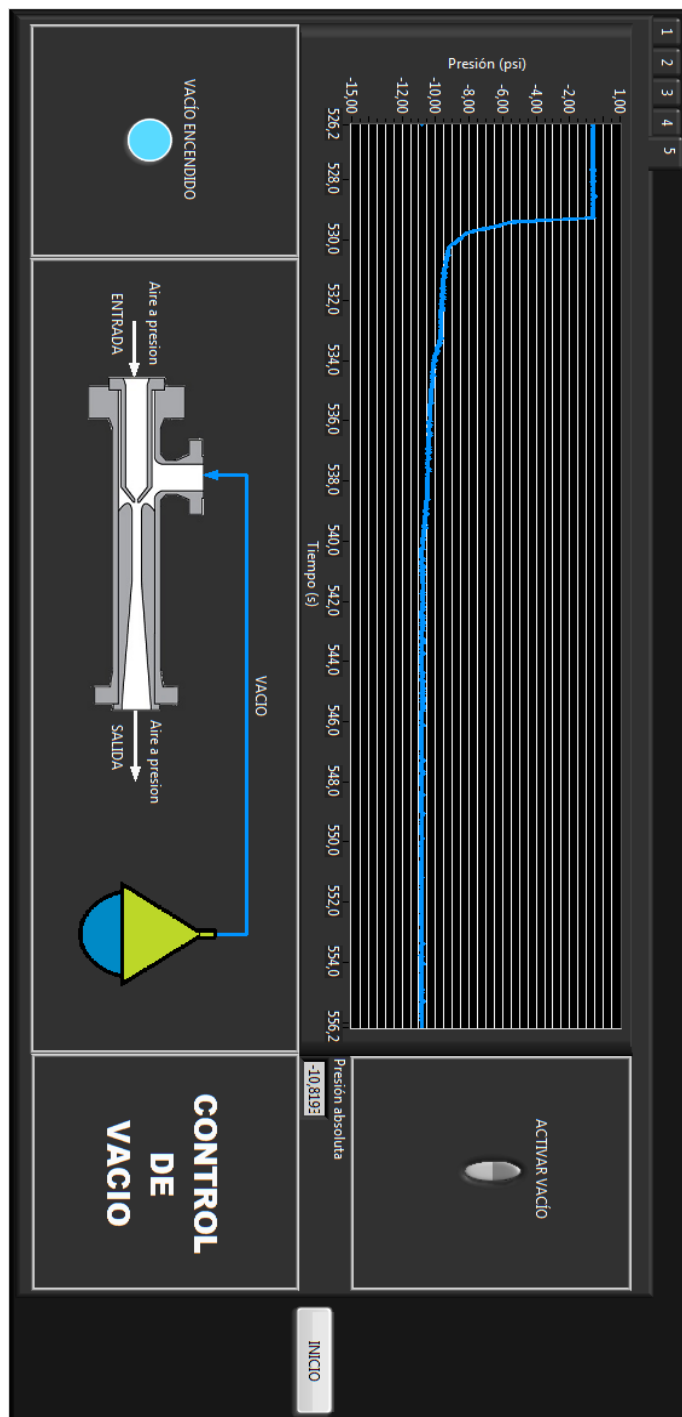
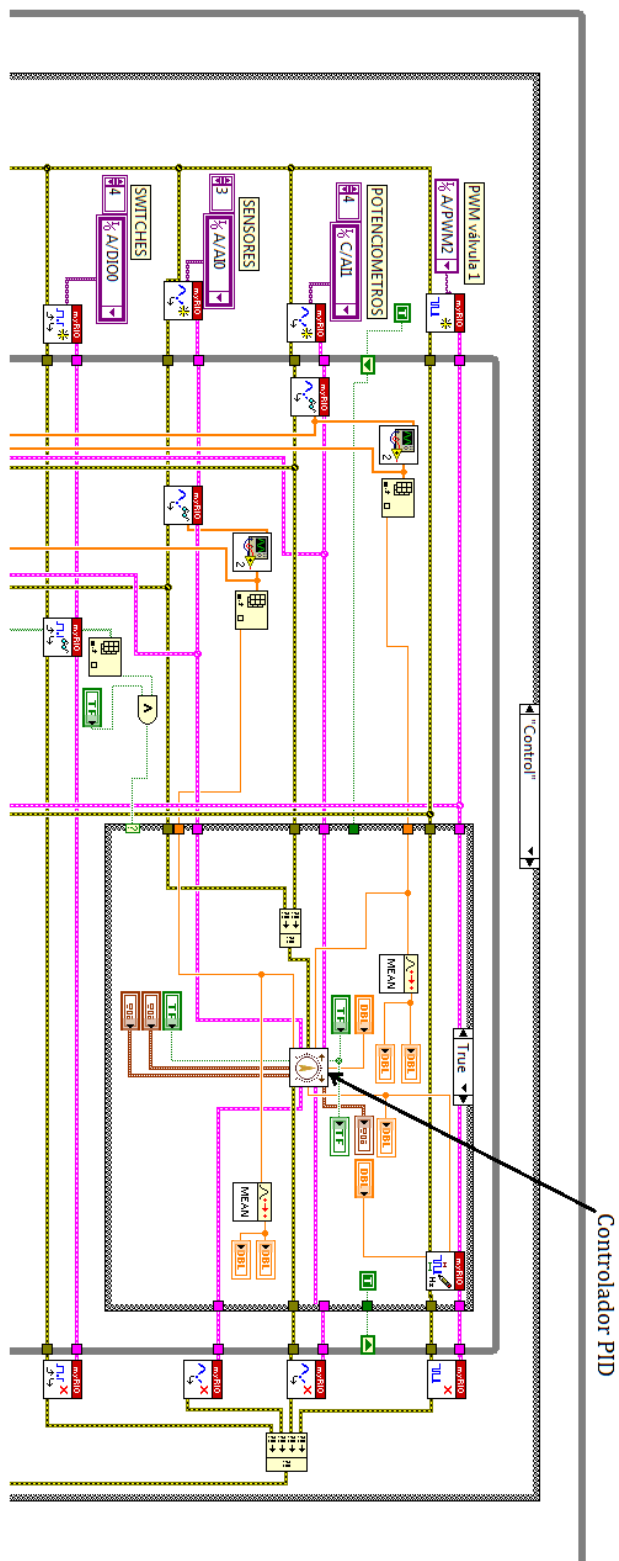


Figura III.D. Pantalla de Control de vacío.



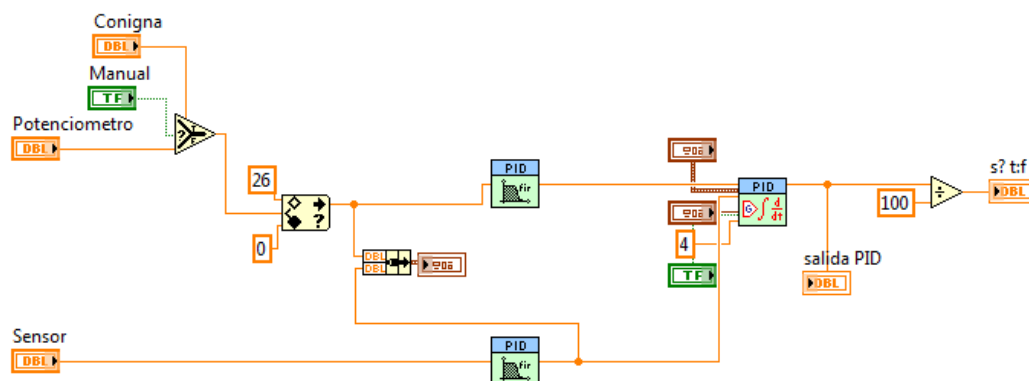


#### IV.B. CÓDIGO DE LA PANTALLA DE CONTROL



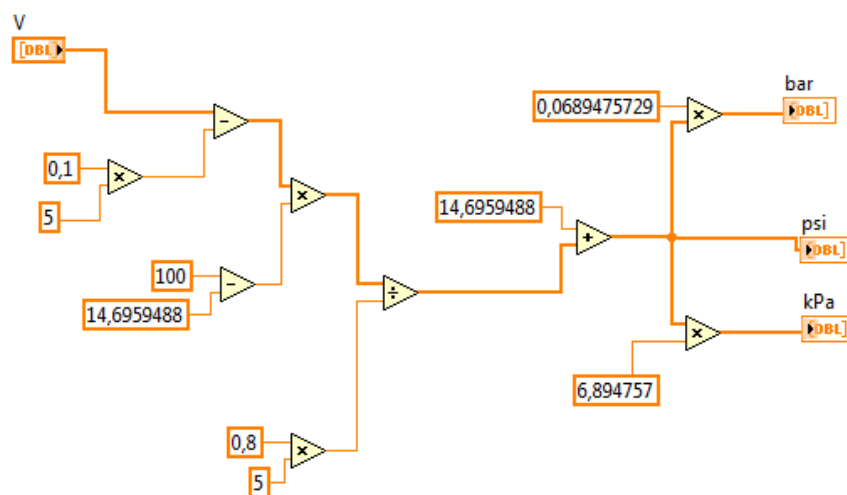
**Figura IV.B. Código de control para el canal 1 de aire a presión.**

#### IV.C. CÓDIGO DEL CONTROLADOR PID



**Figura IV.C.** Código del controlador PID.

#### IV.D. CÓDIGO DE LA CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN



**Figura IV.D.** Calibración del sensor de presión, convirtiendo tensión a presión